

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Camila Pontes Brito da Costa

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO  
DE DEFEITOS NA MONTAGEM DE PCI BASEADO EM REDES  
BAYESIANAS**

Dissertação Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Dr.-Ing. Marcelo Ricardo Stemmer

Florianópolis

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Costa, Camila Pontes Brito da  
Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de defeitos  
na montagem de PCI baseado em Redes Bayesianas / Camila  
Pontes Brito da Costa ; orientador, Marcelo Ricardo  
Stemmer - Florianópolis, SC, 2014.  
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas.

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Redes  
Bayesianas. 3. Sistema multiagente. 4. Sistema  
especialista. I. Stemmer, Marcelo Ricardo. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. III. Título.

Camila Pontes Brito da Costa

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO  
DE DEFEITOS NA MONTAGEM DE PCI BASEADO EM REDES  
BAYESIANAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 28 de Fevereiro de 2014

---

Prof. Dr. Jomi Fred Hübner  
Coordenador do Curso

---

Prof. Dr. –Ing. Marcelo Ricardo Stemmer  
Orientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. –Ing. Marcelo Ricardo Stemmer  
Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Marcos Marinovic Doro  
Instituto Federal de São Paulo

---

Prof. Dr. Jomi Fred Hübner  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Leandro Buss Becker  
Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado a Deus e à  
minha família.



## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é fruto da contribuição de várias pessoas que passaram pela minha vida nos últimos anos. Pessoas que me apoiaram durante e após a mudança do Norte para o Sul do Brasil em busca do sonho do mestrado.

Mas em primeiro lugar eu agradeço a Deus, pois Ele está presente em todos os momentos da minha vida e esteve sempre ao meu lado durante os momentos bons e também nos momentos difíceis do mestrado.

Ao meu querido orientador, Prof. Marcelo Stemmer, que acreditou em mim. Por seu apoio, compreensão e ensinamentos.

Agradeço a todos que enviaram energias positivas e orações para que eu conseguisse concluir o mestrado, especialmente aos meus queridos amigos vovô Chico, tio Pena, tia Vilma e tia Telma que estavam em constante oração por mim.

Aos meus pais Lília e Roberto, que acreditaram no meu sonho e sempre incentivaram os meus estudos e ao meu amado irmão Kell.

Aos meus companheiros do LTIC, Renato, Refatti, Dani Uez, Rômulo, Levi, Scheila, Daniel, Caio, Maicon, entre outros, obrigada pela convivência maravilhosa!

Aos doutorandos Denis Rosário, Luciano Barreto e Jim Lau, obrigada pelos conselhos.

Aos amigos do projeto BRAGECRIM e também aos que me deram apoio durante o sanduíche na Alemanha e cuja amizade ficará para sempre: Charbel, Rafael, Nicole, Natália, Augusto, Ju, Jaqueline Vargas e Daniel Fritzke.

Aos amigos da Igreja São Miguel, minha madrinha Umbelina e família.

Ao querido casal Isadora e João Santanna, por todo o apoio e pelas risadas constantes, obrigada por terem me acolhido como uma família.

À minha irmã de coração Gardene Cunha, não tenho palavras suficientes para agradecer. Durante esses três anos foi minha amiga, psicóloga, ombro pra chorar, conselheira, revisora, torcida organizada. Obrigada por tudo.

Por fim, à minha grande e maravilhosa família: Pontes, Brito, Pimentel, Leimgruber e Costa, que sempre manifestaram sua torcida pela minha vitória.





Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar. Mas o  
mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

(Madre Teresa de Calcutá)



## RESUMO

Devido à grande rotatividade de produtos, a garantia da qualidade é um dos maiores desafios enfrentados em uma linha de produção em pequenas séries. Para superar esse problema, deve-se investir em sistemas flexíveis que possam ser adaptados para novas variedades de produtos. Utilizando como estudo de caso uma linha de montagem de placas de circuito impresso em pequenas séries, foi constatado que o principal problema para a garantia da qualidade é a identificação correta da origem dos defeitos observados durante a etapa de inspeção na linha de produção, visto que a relação entre causa e defeito é muito complexa e possui um alto grau de incerteza. Essa dissertação utiliza como proposta de solução a integração das técnicas de redes bayesianas e sistema multiagente, apresentando como resultado um sistema que possibilita a melhoria na qualidade do diagnóstico de defeitos encontrados na linha de produção utilizada como estudo de caso, quando comparado às soluções apresentadas anteriormente.

**Palavras-chave:** Redes bayesianas, Sistema multiagente, Produção em pequenas séries.



## ABSTRACT

Due to the large product variety, the quality assurance is one of the biggest challenges in small series production (SSP). In order to solve this problem, it is required to develop flexible inspection systems, able to adapt to each new product. Using a small series printed circuit board (PCB) assembly line as a case study, it was identified that one of the main problems for the quality assurance in SSP is the correct identification of the causes of the observed faults during product inspection, knowing that the relation between cause and fault is in most cases complex and has a high degree of uncertainty. This dissertation proposes the integration of Bayesian networks and multiagent system techniques to implement an adaptive PCB fault diagnosis system. The present work shows that the resulting system leads to a higher quality of failure diagnosis on the production line when compared to previous approaches.

**Keywords:** Bayesian Networks, Multiagent Systems, Small Series Production.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Linha de montagem de placas SMT.....	26
Figura 2.1 - Exemplo de rede bayesiana.....	44
Figura 2.2 - Exemplo de rede para o defeito “componente extra” .....	46
Figura 2.3 - Exemplo de rede para o defeito “componente incorreto”.....	47
Figura 2.4 - Cálculo da probabilidade da C47 ser verdadeira dado que CI está presente.....	48
Figura 2.5 - Cálculo da probabilidade da C48 ser verdadeira dado que CI está presente.....	48
Figura 2.6 - Redes dos defeitos CE e CI mescladas .....	49
Figura 2.7 - Cálculo da probabilidade da C47 ser verdadeira dado que CI e CE estão presentes .....	49
Figura 2.8 - Cálculo da probabilidade da C48 ser verdadeira dado que CI e CE estão presentes .....	50
Figura 3.1 - Corte da Tabela de relação causa-defeito. ....	54
Figura 3.2 - Rede Inserora de componentes.....	57
Figura 3.3 - Rede impressora de pasta de solda.....	60
Figura 3.4 - Rede Soldagem por Refusão.....	62
Figura 3.5 - Exemplo de tabela de probabilidades condicionais do defeito “excesso de solda” (ES).....	64
Figura 3.6 - Comunicação entre os agentes.....	68
Figura 3.7 - Fluxograma Geral de Funcionamento dos Agentes de Máquina de Inspeção.....	69
Figura 3.8 - Fluxograma Geral de Funcionamento dos Agentes Especialistas .....	71
Figura 4.1 - Resultado da simulação do cenário 1 .....	75
Figura 4.2 - Resultado da simulação do cenário 2.....	77
Figura 4.3 - Resultado da simulação do cenário 3.....	79
Figura 4.4 - Resultado da simulação do cenário 4.....	81





## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Relação causa-defeito do defeito “buraco na solda” .....	35
Tabela 2.2 - Relação causa-defeito do defeito “excesso de solda” .....	36
Tabela 2.3 - Comparação entre métodos de diagnóstico .....	43
Tabela 2.4 - Tabela de probabilidades do defeito “componente extra” .....	46
Tabela 2.5 - Tabela de probabilidades do defeito “componente incorreto” .....	47
Tabela 3.1 - Dados da rede da Inserora de componentes .....	57
Tabela 3.2 - Dados da rede da Aplicadora de pasta de solda.....	59
Tabela 3.3 - Cálculo do tamanho do arquivo da rede impressora de pasta de solda.....	59
Tabela 3.4 - Dados da rede do Forno de refusão .....	61
Tabela 4.1 - Comparação entre os sistemas analisados .....	86



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AOI – *Automated Optical Inspection* (Inspeção óptica automatizada)

BRAGECRIM – *Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology* (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura)

CERTI – Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras

COGMET – *Cognitive Metrology for Flexible Small Series Production* (metrologia cognitiva para produções em pequenas séries)

FIPA – *Foundation for Intelligent Physical Agents* (Fundação para Agentes Físicos Inteligentes)

JADE – *Java Agent Development Framework* (Framework Java para desenvolvimento de agente)

PCI – Placa de circuito impresso

PPS – Produção em pequenas séries

RB – Rede Bayesiana

SE – Sistema especialista

SMD – *Surface-Mounting Device* (dispositivo de montagem em superfície)

SMT – *Surface-Mounting Technology* (tecnologia de montagem em superfície)

SPI – *Solder paste inspection* (inspeção de pasta de solda)

S2iAOI – *Automated Optical Inspection machine from Industrial Intelligent Systems group* (máquina de inspeção óptica automatizada do grupo de sistemas inteligentes industriais)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1	OBJETIVOS.....	27
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>27</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	<i>27</i>
1.2	METODOLOGIA .....	27
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	28
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>31</b>
2.1	A QUESTÃO DA QUALIDADE NA PPS .....	31
2.2	DEFEITOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO .	33
2.3	TRABALHOS RELACIONADOS .....	36
2.4	AGENTES E SISTEMA MULTIAGENTE.....	41
2.5	REDES BAYESIANAS .....	43
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>53</b>
3.1	ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DO PROBLEMA .....	53
3.2	FERRAMENTAS UTILIZADAS .....	54
3.3	O SISTEMA .....	55
3.3.1	<i>Modelagem das redes bayesianas .....</i>	<i>55</i>
3.3.2	<i>Tabelas de probabilidades e seus cálculos.....</i>	<i>63</i>
3.3.3	<i>Comunicação entre os agentes.....</i>	<i>67</i>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>73</b>
4.1	TESTES PROPOSTOS .....	73
4.1.1	<i>Cenário 1: um defeito com uma única causa .....</i>	<i>74</i>
4.1.2	<i>Cenário 2: um defeito com múltiplas causas.....</i>	<i>76</i>
4.1.3	<i>Cenário 3: múltiplos defeitos com uma única causa.....</i>	<i>78</i>
4.1.4	<i>Cenário 4: múltiplos defeitos com múltiplas causas .....</i>	<i>80</i>
4.2	COMPARAÇÕES COM TRABALHOS ANTERIORES	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....</b>	<b>89</b>
5.1	PERSPECTIVAS .....	91
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO A – SIGLAS DE DEFEITOS .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO B – SIGLAS DE CAUSAS.....</b>	<b>101</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Engels (1999) a história da produção industrial é dividida em três fases: indústria artesanal, manufatura e indústria moderna. A indústria artesanal é caracterizada por um artesão sozinho ou com o auxílio de um ajudante que produz um produto por inteiro, realizando sucessivamente todas as diversas etapas necessárias para a fabricação do produto.

A manufatura surgiu com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva do século XVI até meados do século XVIII (MARX, 1996), trata-se de um sistema de produção que utiliza como base a mão-de-obra humana organizada em um sistema de divisão do trabalho.

Esse sistema pode ser fruto da combinação de diferentes profissões, que realizam trabalhos parciais com o objetivo de gerar um produto final, resultado da junção das partes. Por exemplo, a construção de uma casa é fruto do trabalho de várias profissões independentes, tais como pedreiro, carpinteiro, encanador, etc. Essas profissões trabalham em colaboração entre si.

A manufatura também pode ser a junção de colaboradores da mesma área como, por exemplo, uma cooperativa de costureiras onde todas têm a mesma profissão, porém realizam trabalhos especializados: uma responsável pelo corte dos tecidos, outra pela costura e uma terceira para dar o acabamento.

Já a indústria moderna surgiu a partir da Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra no século XVIII, e é caracterizada por ser um sistema de produção cujo motor de produção é a utilização de máquinas e a mão-de-obra humana se limita a fiscalizar e corrigir os agentes mecânicos.

De 1908 a 1913, movido pela necessidade do aumento da produção e da diminuição dos custos e do tempo de produção, Henry Ford implementou mudanças na linha de produção de sua empresa automobilística, dando início à produção em massa, também conhecida como produção em grandes séries (WOMACK, JONES e ROOS, 2005). Essas mudanças foram baseadas na ideia de priorizar a padronização de peças para simplificar da linha de produção e da utilização de esteiras na planta de produção para diminuir o tempo de produção.

Após 1950, com a difusão da tecnologia e do sistema de produção em massa houve o aumento da concorrência devido à expansão da produção em massa. Porém, no Japão, devido ao pós-guerra as

indústrias não tinham a mesma capacidade de produção em grande quantidade das indústrias americanas e europeias.

Na tentativa de conciliar o baixo capital para investimento em grandes estoques com a demanda de uma maior variedade de produtos do mercado japonês, Ohno e Toyoda introduziram o conceito de produção flexível, também chamado de produção em pequenas séries (PPS), isso aumentou a variedade de produtos produzidos por planta de um para três, e ainda resultou na redução de custos devido à diminuição do estoque (WOOD JR., 1992).

Essa baixa quantidade de produtos por variedade permitiu que os defeitos ocorridos durante a produção fossem observados quase que instantaneamente, garantindo, por sua vez, a correção dos mesmos durante o processo, assim, melhorou a qualidade dos produtos fabricados e diminuiu o desperdício. Além disso, a constante inspeção permitiu, com o tempo, a diminuição da quantidade de retrabalho necessário devido ao constante ajuste dos parâmetros de produção.

Dessa forma, a qualidade do produto virou um diferencial, o que levou à busca por novas técnicas de controle do processo de produção industrial e da inspeção dos produtos.

Uma das abordagens utilizadas para esse aperfeiçoamento é a automação do controle da produção e da inspeção. Dado que a mão de obra humana está sujeita à subjetividade durante uma tomada de decisão, a sua substituição por máquinas, que possuem parâmetros bem delineados para a avaliação de um produto, permite manter uma qualidade padrão do produto.

Dentro do contexto do problema do controle da qualidade de produções em pequenas séries, foi criado o projeto *Cognitive Metrology for Flexible Small Series Production* (COGMET) – Metrologia Cognitiva para Produções em Pequenas Séries – que faz parte da iniciativa *Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology* (BRAGECRIM) – Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura – que possui como objetivo a busca pelo desenvolvimento de sistemas para metrologia e garantia da qualidade de produção em pequenas séries (PFEIFER, SCHMITT, *et al.*, 2010). Este trabalho está inserido no contexto do projeto COGMET.

Do lado brasileiro, o projeto possui como parceiros a UFSC/DAS/S2i, a Fundação CERTI, e o LABElectron. O LABElectron é um laboratório-fábrica da fundação CERTI, que trabalha com o desenvolvimento de projetos e com a manufatura de produtos eletrônicos. Dentre as manufaturas desenvolvidas, o LABElectron



trabalha com uma linha de montagem em pequenas séries de placas de PCI (placa de circuito impresso), com tecnologia SMT (tecnologia de montagem em superfície) que utiliza o processo de soldagem por refusão. Essa linha de produção é o objeto de estudo e aplicação deste trabalho.

O processo de montagem de uma PCI com utilização de tecnologia SMT pode ser resumido em três operações: impressão, inserção e soldagem. Primeiramente é realizada a impressão/aplicação da pasta de solda na placa “nua”. É ela que manterá os componentes SMD presos à PCI, permitindo assim a conexão entre o componente e a trilha de metal. Esse procedimento é executado pela máquina conhecida como *printer*.

Em seguida, a placa passa para a máquina insersora, que realiza o processo de inserção automática dos componentes SMD. A insersora posiciona os componentes acima da pasta de solda, localizada sobre as ilhas da placa, de acordo com a programação realizada durante o *setup*, que é a etapa de configuração dos parâmetros da linha de produção. Após a inserção dos componentes, a PCI vai para o forno que realiza o procedimento de soldagem por refusão, que funde a solda, cria a liga entre os componentes e os fixa à PCI.

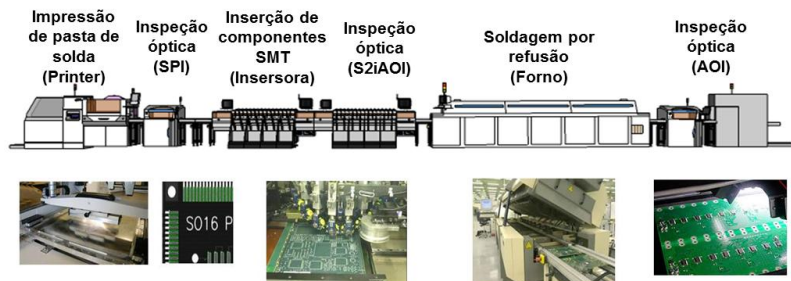
Porém, devido à necessidade de um alto controle de qualidade, que é umas das características de linhas de produção em pequenas séries, existem estações de inspeção óptica entre as operações principais e ao final da linha.

Assim, atualmente, a linha de montagem de placas de circuito impresso utilizada no LABElectron é composta por cinco estações principais: primeiramente existe a estação de impressão de pasta de solda (*printer*); a segunda estação realiza a inspeção de impressão de pasta de solda (SPI); a terceira estação é a inserção de componentes (insersora), seguida pela estação de soldagem por refusão (forno) e por último a estação de inspeção final (AOI).

Porém, dentro do projeto COGMET, está em desenvolvimento uma máquina chamada S2iAOI, que está descrita no trabalho de Melo (2013), e que irá atuar na inspeção dos componentes inseridos pela terceira estação. Portanto no presente trabalho admitiremos que a linha de produção já conta com essa terceira máquina de inspeção.

A Figura 1.1 apresenta um modelo da linha de montagem de placas de circuito impresso utilizada no LABElectron, já considerando o acréscimo da máquina de inspeção S2iAOI.

Figura 1.1- Linha de montagem de placas SMT  
**Linha de montagem de placas SMT**



Durante a etapa de inspeção é comum que mais de um tipo de defeito seja encontrado. Quanto mais cedo a causa de um defeito for identificada e corrigida, menor será a quantidade de retrabalho necessário a ser feito em outras unidades, pois o processo poderá ser corrigido a tempo de não ocorrerem novos defeitos.

Porém, o relacionamento causa-defeito em montagem de placas de circuito impresso não é trivial. A ocorrência desses defeitos pode ter sido influenciada por uma série de fatores como os parâmetros inadequados de *setup* da linha de produção, utilização de materiais corrompidos ou com defeitos de fabricação, o processo utilizado pode não ser o mais adequado, etc (DORO, 2004).

Um defeito pode ter mais de vinte causas possíveis e alguns defeitos possuem causas em comum. São tantas as possibilidades de causas para a ocorrência de um defeito que geralmente é necessário um profissional com grande experiência para fazer o diagnóstico correto.

A falta de um profissional experiente em diagnóstico de defeitos pode acarretar em correções de parâmetros baseadas em tentativa e erro, o que pode levar a mais defeitos, desperdício de produção e aumento do tempo de produção.

Dessa forma, com o objetivo de minimizar o problema da falta de um profissional para a realização de diagnóstico de defeitos em PCI, esta dissertação apresenta como contribuição o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico que prioriza a redução da interferência humana no processo de inspeção e controle da produção e montagem de placas de circuito impresso, visando diminuir o retrabalho no final da produção e a redução do desperdício, que é uma das grandes preocupações da produção em pequenas séries.

O sistema de diagnóstico de defeitos desenvolvido faz parte de um sistema multiagente para proporcionar flexibilidade e permitir a correção de parâmetros inadequados durante a produção, pois a partir do diagnóstico realizado, os parâmetros podem ser corrigidos em tempo de execução.

Como solução para permitir a análise de defeitos em conjunto, o sistema utiliza redes bayesianas como motor de inferência, retornando como resposta ao sistema multiagente as três causas que possuem maior probabilidade de produzir os defeitos detectados.

Os objetivos principais do trabalho são apresentados a seguir, acompanhado da organização da dissertação.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um sistema que proporcione a identificação das possíveis origens de defeitos detectados durante os processos de inspeção em uma linha de produção de montagem de PCI em pequenas séries. Dessa maneira, os parâmetros dos processos geradores de defeitos podem ser corrigidos mais rapidamente, evitando a ocorrência de novos defeitos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Particularmente, os objetivos específicos desta dissertação são:

- Comparar as abordagens propostas anteriormente para a solução do problema;
- Melhorar o diagnóstico dos defeitos;
- Mostrar a eficiência da integração de diferentes técnicas de inteligência artificial visando à melhoria da flexibilidade de uma linha de produção de pequenas séries;
- Desenvolver um sistema utilizando a integração proposta.

## **1.2 METODOLOGIA**

A partir da definição dos objetivos, foi adotado o método de trabalho a seguir.

Com base nos dados obtidos no trabalho de Doro (2012) sobre a relação causa-defeito em linhas de montagem de PCI e visando atender aos objetivos anteriormente definidos, optou-se por utilizar a integração de duas técnicas de inteligência artificial: redes bayesianas e sistema multiagente.

A utilização de sistemas multiagentes faz parte das especificações do trabalho, que deve ser integrado a um sistema multiagente maior que está em desenvolvimento. As redes bayesianas foram utilizadas pois permitem a análise dos defeitos recebidos em conjunto. A partir dessa análise as redes bayesianas retornam o cálculo da probabilidade de uma causa ser a origem dos defeitos analisados.

Desse modo, foram construídas três redes bayesianas que utilizaram como base de conhecimento os dados já citados. Em seguida, as redes foram integradas a três agentes, que fazem parte de um sistema multiagente. As redes bayesianas funcionam como raciocínio cognitivo dos agentes.

Por último, os agentes foram configurados para que pudessem interagir com as diversas máquinas da linha de produção.

Para testar o sistema proposto e verificar seu desempenho, foram elaboradas diversas simulações baseadas em trabalhos anteriores. Foram escolhidos quatro cenários principais de teste: diagnóstico de um defeito que possui apenas uma causa principal, diagnóstico de um defeito que possui múltiplas possibilidades de causas, diagnóstico de múltiplos defeitos possuem que possuem apenas uma causa em comum e diagnóstico de múltiplos defeitos recebidos que possuem múltiplas possibilidades de causas.

Os resultados obtidos durante as simulações foram comparados com os resultados obtidos por abordagens anteriores. Como métrica de comparação dos trabalhos, foram avaliadas características como: objetivo do sistema, tecnologias utilizadas, ferramentas utilizadas e as vantagens e desvantagens dos sistemas, a partir da observação da qualidade do diagnóstico feito, da quantidade de defeitos que podem ser diagnosticados de uma vez e da necessidade de intervenção humana para o diagnóstico.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo 2 apresenta os principais conceitos necessários para o entendimento e desenvolvimento da abordagem proposta, dentre eles a

PPS, as técnicas de inteligência artificial utilizadas (redes bayesianas e sistema multiagente) e também alguns trabalhos relacionados.

O terceiro capítulo expõe o modelo de sistema desenvolvido e detalha a base de dados utilizada, a estrutura das redes bayesianas e a interação entre o sistema e o maquinário utilizado como estudo de caso.

O sistema em funcionamento é apresentado no capítulo 4, onde também são efetuados testes a partir da utilização de cenários preestabelecidos e é feita a comparação do sistema desenvolvido com trabalhos anteriores.

Por fim, no capítulo 5 são mostradas as considerações finais da dissertação, além de sugestões para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A QUESTÃO DA QUALIDADE NA PPS

A produção em pequenas séries (PPS), também chamada de multiproduto (HITOMI, 1993), produção enxuta (SHAH e WARD, 2003) e pequenos lotes (JIANG, ZHANG, *et al.*, 2008), possui como características principais o baixo volume de produção e a alta variedade de produtos que devem ser produzidos em um curto espaço de tempo, porém não existe uma quantidade máxima padrão para que um sistema produtivo seja classificado como PPS (DORO, 2009).

O sistema de PPS é comumente adotado durante a produção de produtos feitos por encomenda, tais como: ferramentas, placas eletrônicas e peças de máquinas.

As características apresentadas geram uma série de dificuldades relacionadas ao gerenciamento da produção, como por exemplo: A cada novo produto a ser produzido, é exigido uma reconfiguração da linha de produção, assim como uma readaptação dos sistemas de inspeção e controle de qualidade. Além disso, uma pequena quantidade de produtos defeituosos, e que necessitam ser descartados, pode corresponder a um grande percentual de produção perdida.

Para diminuir o tempo de reconfiguração da linha (*setup*) e a perda de produtos, deve-se investir em sistemas flexíveis, que possam se adaptar ao novo produto, sem a necessidade de uma grande mudança no sistema de produção e de controle de qualidade.

Com relação ao controle de qualidade, segundo Monden (1984), defeitos não são permitidos na PPS. Por isso, um ponto importante é a escolha do método de controle a ser aplicado.

Devido ao baixo volume de produção, o controle estatístico do processo, que utiliza uma amostra randômica para verificar se o processo está funcionando corretamente, e a amostra de aceitação, utilizada para definir se um lote deve ser aceito ou não baseado nas amostras coletadas (REID e SANDERS, 2012), não são boas alternativas.

Um exemplo disso é o problema enfrentado pelo complexo de Los Alamos, nos Estados Unidos. Durante a Guerra Fria, o complexo de armas nucleares produzia centenas de componentes por ano. Com o fim da Guerra Fria, a demanda foi reduzida para dezenas de componentes por ano. A linha de produção, que era configurada para a produção de

centenas de componentes por ano, necessitou de uma adaptação do sistema de produção para se tornar uma linha de pequenas séries.

A única maneira de identificar se houve o defeito de contaminação durante o processo de soldagem entre aço inoxidável e cobre é o teste destrutivo do objeto. Com a mudança da produção para pequenas séries, o teste destrutivo de um componente passou a ser inviável.

Para solucionar o problema, Davé, Hartman *et al.* (2003) desenvolveram uma estratégia para detecção do defeito de contaminação no processo de soldagem entre cobre e aço inoxidável.

Foram utilizadas redes neurais para o reconhecimento de padrões nos sinais acústicos e vibracionais coletados durante o processo de soldagem. A rede foi treinada com dados de inspeções anteriores e, após seu treinamento, a rede atingiu 100% de precisão na identificação da qualidade da soldagem. Apesar de ser citado que a rede também identifica a causa do defeito, não foi explicado como isso acontece.

A inspeção de uma peça com a utilização do sistema de amostra, que no caso do exemplo utilizado é um teste destrutivo, representa a perda de 10% da produção se levarmos em consideração a produção de dez peças por ano.

Dessa maneira, a melhor opção é utilizar uma inspeção contínua, que busca uma produção sem defeitos e ainda diminui o tempo entre a descoberta do defeito e sua correção (DUVALL, MATYAS e GLOVER, 2007). Essa inspeção combinada com o ajuste contínuo do processo evita a aparição de novos defeitos.

Um exemplo de aplicação do ajuste contínuo do processo em PPS é o sistema desenvolvido por Jiang, Zhang *et al.* (2008). Eles criaram um sistema de controle contínuo que integra prevenção, análise e diagnóstico para o ajuste dos parâmetros do processo de PPS.

Para a criação do sistema de diagnóstico da qualidade do processo foram utilizadas redes neurais recorrentes de Elman, responsáveis pela procura de fatores chave que influenciam a qualidade e pelo encontro de fatores de combinação ótimos. Esses dados são enviados para um sistema especialista que analisa a situação atual da produção e determina a ação a ser tomada e os valores que são utilizados na correção de parâmetros do processo.



## 2.2 DEFEITOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Segundo Ma e Tehranipoor (2011, p. 6-7, tradução nossa), “um defeito em um sistema eletrônico é a diferença não intencional entre o *hardware* implementado e o seu *design* esperado”, enquanto que uma falha é “uma representação de um ‘defeito’ no nível funcional abstrato [...]”.

Atualmente, o controle de qualidade possui como objetivo um melhor controle do processo com o objetivo da redução de defeitos e não mais apenas encontrar defeitos e rejeitar placas defeituosas (BURR, 1997). Afinal, 70% do preço de uma PCI é formado por custos de materiais, então jogar fora uma PCI defeituosa não é viável. Assim, é necessária a utilização da inspeção durante o processo e não somente após a soldagem dos componentes.

A inspeção durante o processo de montagem permite que defeitos sejam encontrados antes que um maior valor seja agregado à placa. Isso permite a correção do processo através do ajuste de parâmetros de controle antes que ocorra o aumento do número de defeitos (e a sua significância), e evita que mais placas defeituosas sejam montadas até o seu estágio final.

De acordo com Gebus e Juuso (2002), quanto maior o número de componentes de uma PCI, maior a sua complexidade e consequentemente maior é a sua taxa de defeitos. Esse cálculo é realizado a partir do rendimento total de produção, cuja fórmula é apresentada na Eq. 1, onde  $R$  é o rendimento por componente e  $C$  é o número de componentes por placa.

$$\text{Rendimento total de produção} = R^C \quad (1)$$

Por exemplo, uma PCI com 100 componentes, com rendimento de 0,999 para cada componente, tem um rendimento total de produção de 90,47%. No entanto, uma placa com 1000 componentes e o mesmo rendimento por componente possui um rendimento total de 36,76%, o que significa que quase dois terços da produção deve possuir alguma avaria.

Uma fórmula utilizada para estimar o custo de um defeito ou falha em cada estágio do processo é a “10x”, que diz que o custo do retrabalho em cada estágio é 10 vezes maior que o custo do estágio anterior. Por exemplo, se um defeito de impressão de solda custa R\$1,00 para ser corrigido logo quando foi identificado, corrija-lo depois da inserção de componentes custará R\$10,00, a correção após o forno de

refusão custará R\$100,00 e a correção após o teste funcional custará R\$1000,00.

Conway, Williams, *et al.* (1990) apresentam um estudo das diversas variáveis de processo relacionadas à montagem de PCI utilizando o processo de soldagem por refusão e relacionam a variação de parâmetros com o surgimento de defeitos.

As variáveis que influenciam o processo podem ser divididas em três tipos: ambiental, material e parâmetros de configuração de equipamento (CONWAY, WILLIAMS, *et al.*, 1990). Um tipo de variável material é a pasta de solda, como exemplos de variáveis ambientais existem a temperatura e a umidade, e um exemplo de variável de parâmetro de configuração é a velocidade do rodo de impressão de pasta de solda. Esses quatro parâmetros distintos dados como exemplo afetam o mesmo processo: a impressão de pasta de solda.

Por exemplo, uma característica observada durante a inspeção da impressão da pasta de solda é a quantidade de solda depositada sobre os *pads*. Se a quantidade depositada não for a ideal, poderá haver o aparecimento de defeitos como ausência ou insuficiência de solda, curto e excesso de solda.

Se a pasta de solda (variável material) utilizada é de baixa qualidade ou está fora da validade isso pode interferir na viscosidade e na aderência da pasta e resultar em uma alteração na quantidade de solda depositada na placa durante o processo de impressão.

A temperatura e a umidade (variáveis ambientais) também influenciam na viscosidade da pasta de solda, pois se a viscosidade da pasta aumenta, a quantidade de pasta de solda depositada na placa diminui.

A velocidade do rodo de impressão (variável de parâmetro de configuração) também influencia na deposição da pasta de solda. A alta velocidade do rodo diminui a quantidade de pasta de solda depositada, enquanto que uma velocidade baixa pode causar uma deposição em excesso de pasta de solda.

A relação causa-defeito em PCI é uma relação nebulosa mesmo para os especialistas no assunto. Um defeito pode ter várias causas possíveis e inclusive pode ser fruto de mais de uma causa ao mesmo tempo. Além disso, uma causa pode originar defeitos diferentes e uma única placa usualmente possui mais de um defeito. Um exemplo dessa relação entre causa e defeito pode ser dado com os defeitos “buraco na solda” e “excesso de solda”.

Doro (2012) realizou um estudo sobre a relação causa-defeito em PCI e classificou a relação em três níveis: baixo impacto (1), médio

impacto (2) e alto impacto (3), de acordo com o nível de influência que uma determinada causa exerce para provocar a aparição de um defeito.

De acordo com o estudo feito por Doro (2012), o defeito “buraco na solda” possui nove causas possíveis, que estão catalogadas na Tabela 2.1. De acordo com a Tabela 2.1, três causas interferem com alto impacto para a geração do defeito “buraco na solda”, enquanto duas exercem um impacto médio e quatro exercem um impacto baixo.

Tabela 2.1 - Relação causa-defeito do defeito “buraco na solda”

Causa		Defeito: Buraco na solda
Causa potencial	Código da Causa	Impacto
Soldabilidade inadequada dos componentes ou da placa de circuito impresso	C3	1
Impressão de pasta de solda desalinhada	C17	1
Impressão de pasta de solda borrada	C20	1
Viscosidade baixa da pasta de solda	C33	2
Baixa atividade do fluxo da pasta de solda	C35	1
Pasta de solda expirou sua vida útil ou deteriorou	C37	3
Pré-aquecimento acelerado	C58	3
Funcionamento inadequado do forno de refusão	C65	3
Umidade alta	C67	2

Já o defeito “excesso de solda” possui quatro causas possíveis que estão catalogadas na Tabela 2.2, uma causa com alto impacto, uma com médio impacto e duas com baixo impacto.

Portanto, no caso de um sistema de inspeção detectar um defeito do tipo “buraco na solda”, qual causa deveria ser considerada como a principal? Como decidir entre as três causas com alto impacto? E ainda

assim, é possível assumir que uma causa de baixo impacto não pode ser a real causa do defeito?

E caso a inspeção detectasse apenas o defeito “excesso de solda”? E se fossem detectados os dois defeitos simultaneamente, qual causa seria escolhida como principal?

Se as duas tabelas forem observadas, pode-se notar que os dois defeitos possuem três causas potenciais em comum: “impressão de pasta de solda borrada” (C20), “pasta de solda expirou sua vida útil ou deteriorou” (C35) e “funcionamento inadequado do forno de refusão” (C67). Nesse caso é possível admitir que uma causa das três causas em comum possa ter causado os dois defeitos ou assume-se que foram duas causas diferentes que resultaram nos defeitos já mencionados?

Tabela 2.2 - Relação causa-defeito do defeito “excesso de solda”

Causa		Defeito: Excesso de Solda
Causa potencial	Código da Causa	Impacto
Impressão de pasta de solda em excesso	C18	3
Impressão de pasta de solda borrada	C20	2
Pasta de solda expirou sua vida útil ou deteriorou	C37	1
Funcionamento inadequado do forno de refusão	C65	1

A decisão a ser tomada vai depender do tipo de raciocínio utilizado, do conhecimento prévio do especialista e de suas experiências anteriores, por isso é importante a criação de um sistema que realize a tomada de decisão utilizando um padrão de raciocínio.

## 2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

A maioria dos trabalhos encontrados relacionados com diagnóstico em PCI trata da localização de defeitos (por meio de inspeção óptica automática) ou de falhas. Eles realizam o diagnóstico da

PCI procurando falhas, através de testes funcionais, que a inspeção visual ou humana deixou passar ou é incapaz de detectar, como no caso de um componente defeituoso, e não o diagnóstico do defeito em si como é proposto neste trabalho.

Dentre os trabalhos que tratam do diagnóstico de algum tipo de defeito em montagem de placas de circuito impresso destacam-se os trabalhos seguintes.

Cheng, Chen, *et al.* (1997) sugeriram um *framework* para um sistema inteligente de suporte a decisão em tempo real para o controle do processo de montagem de PCI. Esse sistema é composto por um módulo de controle estatístico do processo, que utiliza redes neurais para identificar se o processo está “fora de controle”, isto é, se algum processo não está seguindo as especificações determinadas; um motor de inferência que utiliza redes neurais para identificar as possíveis causas de o processo estar fora de controle; uma interface com o usuário; um banco de dados relacional para a geração de relatórios e um sistema especialista para sugestão de possíveis modificações.

A rede neural envia o para o sistema especialista quais as possíveis causas do descontrole do processo. No caso do sistema especialista não encontrar uma solução única, um fator de confiança é fornecido para cada solução apresentada. O usuário então deve selecionar uma das soluções apresentadas para que seja realizado o ajuste dos parâmetros do processo.

O problema do *framework* proposto é que a utilização de redes neurais (necessitam de treinamento) e de controle estatístico do processo (necessita de dados significativos do processo) não é viável em um ambiente de pequenas séries.

Venkateswaran, Srihari, *et al.* (1997) desenvolveram um sistema para controle em tempo real do processo de impressão de pasta de solda. Esse sistema é composto por três subsistemas: um consultor de processo que ajuda o operador a estabelecer os parâmetros de setup do processo de impressão, um sistema de controle inteligente que controla o processo de impressão em tempo real e um sistema de diagnóstico que é utilizado para solucionar problemas do processo.

O sistema de diagnóstico é ativado quando, durante o controle estatístico do processo, o sistema de controle identifica um desvio contínuo da qualidade da impressão da pasta de solda.

O sistema diagnostica seis defeitos: curto, volume excessivo de pasta de solda, volume insuficiente de pasta de solda, *scooping* (pasta de solda com perfil côncavo e menor volume que o esperado), *sticking*

(quando a pasta de solda adere ao substrato em áreas entre os *pads*) e falta de pasta de solda.

O diagnóstico é realizado através de um sistema especialista fuzzy, que identifica a causa do desvio de qualidade, decide a ação corretiva necessária para evitar novas ocorrências do defeito e realiza o recálculo e a atualização dos valores de velocidade e pressão do estêncil. Uma explicação da causa do defeito e da ação tomada é apresentada ao usuário, seguida de recomendações para a eliminação/prevenção da ocorrência desses defeitos.

O sistema proposto foi adaptado para produção em larga escala, ele é especializado na identificação de defeitos do processo de impressão de pasta de solda, mas não são revelados quais defeitos são diagnosticados, nem como é o diagnóstico é realizado a partir do sistema especialista fuzzy. Sua preocupação principal é o cálculo ótimo da velocidade e pressão do estêncil.

Kusiak e Kurasek (2001) desenvolveram um sistema de diagnóstico do defeito bola de solda em PCI voltado para produção em massa. Eles utilizaram teoria dos conjuntos aproximados (*rough set*) para fazer a mineração dos dados. Foram escolhidas 14 *features* que podem interferir no aparecimento de bolas de solda, dentre elas a composição, espessura e a frequência de limpeza do estêncil.

Durante três meses foram coletadas 10 placas, sendo as 5 primeiras e as 5 últimas produzidas, de cada lote de placas fabricado (cada lote possui de 5 a 500 placas), totalizando 2052 placas. Essas placas eram inspecionadas com raio-x e se uma placa possuía bola de solda, então era anotada a localização do defeito e o componente. No total, 89 placas possuíam bola de solda. O sistema apresentou uma precisão de classificação de dados de 52,52% para o diagnóstico do defeito de bola de solda como “presente” e 99,95% para o defeito diagnosticado como “ausente”.

A solução utilizada também não se aplica à produção em pequenas séries, pois são necessários dados históricos do processo para a realização do raciocínio, além disso, a solução proposta contempla o diagnóstico de apenas um defeito.

Simon-Zanescu, Streza e Svasta (2004) desenvolveram um sistema para predição de parâmetros de configuração do forno de refusão baseado nos parâmetros da placa e em experiências anteriores. O operador entra com os parâmetros da placa, como por exemplo, a distribuição de componentes, a pasta de solda utilizada e o material da placa. O sistema possui 11 parâmetros que atuam no controle do

processo e representam o diferencial entre o valor atual e o valor esperado daquele parâmetro.

Foram catalogados 12 defeitos que são encontrados após a soldagem por refusão, dentre eles “bola de solda”, “curto” e “componente desalinhado”. Esses defeitos foram quantificados em três níveis de gravidade: menor (um ou poucos defeitos identificados em elementos diferentes na placa), médio (entre o menor e o maior) e maior (quase todos os elementos possuem o defeito).

Os defeitos encontrados podem estar relacionados com 22 causas catalogadas, como por exemplo, “temperatura baixa na zona de pré-aquecimento”, “excesso de pasta de solda” e “pasta de solda oxidada”.

Essa relação causa-defeito é descrita em uma tabela na qual se um defeito X está relacionado a uma causa Y, essa causa recebe um valor numérico. Esse valor numérico, quando somado com todos os valores numéricos de todas as causas relacionadas, deve resultar em 100. Esse valor individual será quantizado em um dos três níveis de gravidade e, assim, um defeito é definido por uma soma ponderada de causas.

Algumas dessas causas não têm relação com o processo de soldagem por refusão e, portanto, não podem ser eliminadas usando o software, mas as causas que tem relação com a soldagem são avaliadas, quantificadas e é gerado um vetor de correção baseado nos parâmetros atuais, na causa detectada e no nível do defeito.

O sistema proposto diagnostica apenas 12 defeitos que são encontrados após o processo de soldagem por refusão, deixando de lado defeitos durante a inserção de componentes e durante a aplicação de pasta de solda. Não foi descrito que método de raciocínio foi utilizado, porém a heurística utilizada de relacionar um defeito com suas causas possíveis através da atribuição de valores que somados resultam em 100 é uma abordagem interessante.

Dentre os trabalhos desenvolvidos por Doro (2009), foi criado um sistema especialista clássico para diagnóstico dos defeitos em uma linha de pequenas séries de montagem de placas de circuito impresso. O sistema foi criado através da ferramenta Expert Sinta, utiliza um conjunto de regras do tipo SE-ENTÃO e realiza o diagnóstico de mais de 38 defeitos relacionados ao processo de montagem com tecnologia SMT e THT.

Esse sistema é inicializado pelo usuário, realiza o diagnóstico de um defeito por vez e a entrada do sistema é apenas um defeito.

O software desenvolvido é baseado principalmente em perguntas sobre a adequação dos parâmetros utilizados dentro do processo de

produção atual, como por exemplo, se a velocidade da esteira que realiza o transporte dos produtos dentro do forno de refusão está adequada ou inadequada.

Quando um parâmetro inadequado é identificado, o sistema apresentará como resposta as possíveis causas relacionadas com o parâmetro inadequado do defeito diagnosticado com um grau de confiança previamente estipulado. O sistema também apresenta uma lista de ações para a correção dos problemas e cabe ao usuário decidir que ação tomar.

Devido ao fato do ser humano utilizar critérios subjetivos para julgamento, a entrada de dados por diferentes usuários pode resultar em diferentes respostas do sistema, visto que um pode considerar um parâmetro adequando enquanto o outro pode discordar.

Uma desvantagem desse sistema é que ele analisa apenas um defeito por vez, não levando em consideração a ocorrência dos defeitos em conjunto e que uma causa pode originar vários defeitos diferentes.

Além disso, o diagnóstico do sistema leva em consideração apenas uma propriedade, que quando dita “inadequada” termina o raciocínio do sistema, sem levar em consideração a possibilidade de outras propriedades também estarem inadequadas. Porém o sistema já foi testado e implantado em fábrica e demonstrou-se satisfatório para os propósitos aos quais ele se propõe.

Vargas (2012) propôs um sistema especialista baseado no sistema proposto por Doro (2009). O sistema especialista clássico, baseado em regras SE-ENTÃO, realiza o diagnóstico de 34 defeitos relacionados à montagem de PCI que utilizam o processo SMT e THT voltados para PPS e é capaz de realizar o diagnóstico de vários defeitos por vez.

O sistema foi desenvolvido dentro do paradigma de sistemas multiagentes utilizando a ferramenta Jason (BORDINI, HUBNER e WOOLDRIDGE, 2007), um interpretador para uma versão da linguagem AgentSpeak utilizada para a comunicação entre agentes, que está constantemente recebendo atualizações.

O paradigma de sistemas multiagentes permite que a comunicação seja realizada diretamente entre máquinas, não existindo assim a necessidade de um operador para a inicialização do sistema ou para a correção de um parâmetro do processo.

Esse sistema especialista analisa múltiplos defeitos recebidos, mas, assim como o trabalho de Doro (2009), os defeitos são analisados individualmente, e a resposta dada pelo sistema é uma relação de todas as causas que possuem alguma relação com aquele defeito, sem levar em conta que algumas causas podem ser mais ou menos prováveis.



Portanto, quando um defeito possui várias causas possíveis, o sistema iria alterar todos os parâmetros relacionados ao defeito, o que pode levar à criação de novos defeitos.

Dentre os sistemas pesquisados na literatura e apresentados neste tópico, os considerados mais completos em termos de diagnóstico de defeitos em montagem de PCI em pequenas séries são os trabalhos de Doro (2009) e Vargas (2012), porém a heurística utilizada por Simon-Zanescu, Streza e Svasta (2004) também apresenta uma abordagem interessante para a relação causa-defeito. Assim, esses três trabalhos são utilizados como base para o desenvolvimento da solução proposta nesta dissertação.

## 2.4 AGENTES E SISTEMA MULTIAGENTE

Agentes são definidos de diferentes maneiras por vários autores como Brustoloni (1991), Russel e Norvig (2002) e Maes (1995), mas no presente trabalho, será utilizada a definição de Wooldridge (2009) que caracteriza um agente como um sistema computacional capaz de ações autônomas dentro de um ambiente para atingir seus objetivos.

Por ações autônomas podemos entender que um agente não precisa de intervenção humana para executar suas ações (WOOLDRIDGE e JENNINGS, 1995).

Agentes podem ser classificados em reativos e cognitivos. Os agentes reativos possuem comportamentos simples de estímulo-resposta, enquanto que agentes cognitivos são capazes de manipular, extrair e utilizar as informações obtidas (JUNG, 2001).

Algumas das características desejáveis de um agente são: habilidade social (capacidade de comunicação e cooperação), reatividade (capacidade de interação com o ambiente) e pró-atividade (tomada de iniciativa para cumprimento de objetivos).

Um sistema multiagente (SMA) é um sistema composto por um número de agentes que interagem entre si (POSLAD, 2007) (MARZOUGUI e BARKAOUI, 2013).

Essa interação pode ser realizada através da utilização de uma linguagem de comunicação de agentes. A FIPA (FIPA, 2014) é uma entidade que desenvolve especificações para permitir a interoperabilidade entre sistemas multiagentes através da especificação de protocolos de interação (POSLAD, 2007).

A FIPA desenvolveu a linguagem FIPA ACL com a qual os agentes se comunicam através da utilização de performativas. Dentre os

vários tipos de performativas, as principais são *inform*, *query if* e *request*.

A performativa *inform* é utilizada por um agente que deseja informar a outro agente receptor que uma dada proposição é verdadeira. A performativa *query if* é utilizada quando um agente pergunta para outro se uma proposição é verdadeira ou falsa. E a performativa *request* serve para um agente solicitar que o agente receptor da mensagem realize uma ação (FIPA, 2002).

Algumas estratégias de comunicação entre agentes são: comunicação direta (um agente sabe da existência do outro e se comunica com ele diretamente sem intermediários), comunicação por sistemas federados (a comunicação entre dois agente se dá através de agentes mediadores), comunicação por *broadcast* (a mensagem é enviada para todos os agentes) e comunicação por *blackboard* (as mensagens são armazenadas em um repositório compartilhado) (NETO, 2007).

Uma das grandes vantagens da utilização de sistemas multiagentes é a possibilidade de decomposição de um problema complexo entre agentes colaboradores autônomos, responsáveis por solucionar subproblemas de maneira colaborativa. Assim, um problema complexo é resolvido por partes (HALLENBORG e DEMAZEAU, 2006).

Um exemplo da flexibilidade proporcionada pela utilização de agentes é vista no trabalho de Schmitt, Pfeiffer *et al.* (2011), onde é descrita uma abordagem utilizando SMA para garantia da qualidade.

Essa abordagem utiliza como estudo de caso uma máquina de inspeção de faróis que foi agentificada para realizar a inspeção automaticamente e agora os agentes são responsáveis por ações como planejamento de rotas, planejamento de inspeção automática e adaptação dos sistemas de inspeção.

A técnica de SMA também foi utilizada no trabalho de Vargas (2012), citado no tópico anterior, que desenvolveu um sistema especialista clássico baseado em agentes para diagnóstico de defeitos em placas de circuito impresso.

O presente trabalho é desenvolvido no contexto de um sistema multiagente para pequenas séries que faz parte da tese de doutorado de Roloff (2013). Devido às características de flexibilidade de um sistema multiagente, os agentes desenvolvidos nesse trabalho serão incorporados ao trabalho de Roloff (2013).

## 2.5 REDES BAYESIANAS

Os métodos mais utilizados para sistemas de diagnóstico são redes neurais, teoria dos conjuntos fuzzy e redes bayesianas. Uma comparação entre algumas características desses métodos foi feita por Han, Li e Xu (2008) e essa comparação é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Comparação entre métodos de diagnóstico

Características	Redes Neurais	Teoria dos Conjuntos Fuzzy	Redes Bayesianas
Fonte de Conhecimento	Enorme	Enorme	Relativamente pequena
Expressão de relacionamento no conhecimento	Difícil	Fácil	Fácil
Tratamento de dados incertos	Fácil	Fácil	Fácil
Tipo de incerteza	Fuzzy, probabilidade	Fuzzy	Probabilidade
Representação da incerteza	Vetor de pesos	Pertinência	Probabilidade
Explicação	Difícil	Difícil	Fácil

Fonte: Adaptado de Han, Li e Xu (2008)

Por essas características de facilidade de representação do conhecimento, facilidade de explicação, possibilidade de tratamento de incertezas com facilidade através da utilização de probabilidades e a necessidade de uma fonte de conhecimento relativamente pequena, a técnica de redes bayesianas foi escolhida para ser o método de inferência do sistema de diagnóstico desenvolvido neste trabalho.

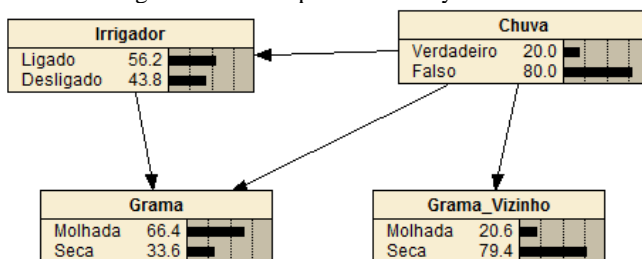
Uma rede bayesiana (RB) pode ser descrita como um método de raciocínio que mistura teoria dos grafos e o teorema da probabilidade de Bayes com o objetivo de utilizar grafos acíclicos direcionados para modelar um cenário do qual se tem conhecimento parcial ou incompleto (CHARNIAK, 1991).

Elas são chamadas assim pois realizam o raciocínio através de relações causais descritas por probabilidades condicionais baseadas no Teorema de Bayes (BAYES e PRICE, 1763), explicado mais adiante.

A estrutura de uma RB é formada por nodos, que representam as variáveis, e possuem dois ou mais valores – por exemplo, verdadeiro e falso –, que representam o estado atual daquela variável, e por arestas direcionadas que comumente representam uma relação de causa e efeito entre as variáveis, onde se uma aresta vai de A para B, então é dito que A causa B ou que A é pai de B e B é filho de A.

Um exemplo dessa estrutura é mostrado na Figura 2.1, onde existe uma aresta saindo do nodo Chuva em direção aos nodos Grama e Grama\_Vizinho, indicando que o nodo Chuva influencia o estado dos nodos Grama e Grama\_vizinho, pois, se choveu a grama deve estar molhada.

Figura 2.1 - Exemplo de rede bayesiana



Fonte: Adaptado de Jensen (1996)

A Figura 2.1 mostra um exemplo adaptado de Jensen (1996), onde, a partir da observação do estado da grama da sua casa, um observador A que possui um irrigador no jardim deseja saber se choveu na noite anterior.

Para isso, ele observa o estado da sua grama. Se ela está molhada existem duas opções: ou choveu na noite anterior, ou sua esposa ligou o irrigador. Para chegar a uma conclusão, ele observa a grama do vizinho, que não possui irrigador. Se a grama do vizinho também está molhada, então ele pode concluir que choveu no dia anterior, caso contrário, se a grama do vizinho estiver seca, pode-se concluir que a grama do observador estava molhada porque o irrigador foi ligado.

Em uma rede bayesiana, esse tipo de raciocínio utilizado para a descoberta do estado da grama e o relacionamento entre essas variáveis são modelados a partir do Teorema de Bayes (BAYES e PRICE, 1763). Esse teorema é fundamentado na teoria da probabilidade condicional, e é representado pela Eq. 2 (JENSEN e NIELSEN, 2007), que calcula a probabilidade de acontecer um evento B, dado que A aconteceu.

$$P(B|A) = \frac{P(A|B).P(B)}{P(A)} \quad (2)$$

Essa equação descreve que a probabilidade do acontecimento de um evento dado o conhecimento da ocorrência de outro evento deriva do relacionamento entre os eventos envolvidos e da probabilidade de ocorrência de cada evento.

A probabilidade conjunta  $P(U)$  de uma rede é dada pela Eq. 3 (JENSEN e NIELSEN, 2007), que representa o produto das tabelas de probabilidades condicionais de um nodo  $A_i$  em relação aos seus pais  $pa(A_i)$ .

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(A_i | pa(A_i)) \quad (3)$$

Quando existe o conhecimento sobre o estado de um nodo, diz-se que uma evidência (e) foi observada. A probabilidade atualizada dos nodos de uma rede passa a ser dada em relação ao conjunto de evidências observadas, como mostrado na Eq. 4 (JENSEN e NIELSEN, 2007).

$$P(A|B, e) = P(A|e) \quad (4)$$

Os valores de maior interesse no resultado de uma RB são as probabilidades marginais dos nodos dos quais não existe conhecimento sobre o seu estado. A obtenção das probabilidades marginais é feita a partir da soma de todas as probabilidades onde um nodo encontra-se no estado desejado para cada estado de cada variável (SAHEKI, 2005).

Por essa facilidade para representar um conhecimento através de probabilidades e pela capacidade de previsão e de lidar com incertezas, redes bayesianas são utilizadas em casos onde não se possui conhecimento total sobre o domínio.

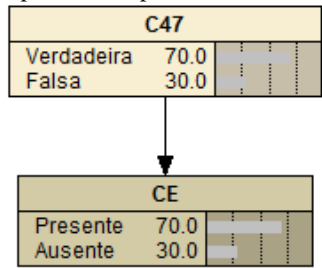
Como mostrado na seção 2.2, o relacionamento entre um defeito e sua causa na montagem de PCI é repleto de incertezas e por isso a utilização de redes bayesianas é uma abordagem interessante para a verificação da probabilidade da relação de uma possível causa com um determinado defeito.

Um exemplo de como funciona esse cálculo no caso de um cenário de defeitos em PCI é ilustrado a seguir.

Considere o defeito “componente extra” (CE), que faz parte do processo de inserção de componentes e possui apenas uma causa

possível catalogada no trabalho de Doro (2012), que é a causa “programação incorreta” da insersora de componentes (C47). Uma rede representando essa relação é ilustrada na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Exemplo de rede para o defeito “componente extra”



Sendo a causa C47 a única razão para a ocorrência do defeito CE, pode-se dizer que se o defeito CE está presente em uma placa, então a causa C47 é verdadeira com 100% de probabilidade e falsa com 0%. Assim como pode-se admitir que se o defeito CE não ocorreu em uma placa, então a causa C47 também não ocorreu com 100% de probabilidade e ocorreu com 0%. Essa relação é mostrada na Tabela 2.4.

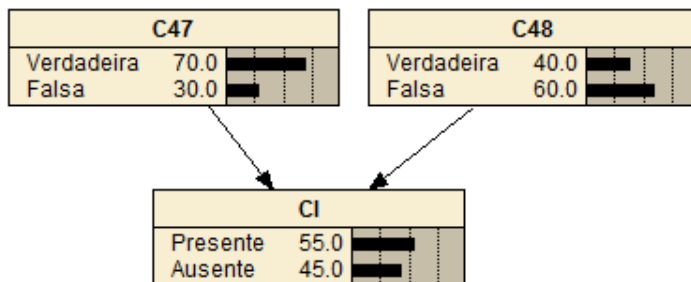
Tabela 2.4 - Tabela de probabilidades do defeito “componente extra”

CE Presente	CE Ausente	C47
100%	0%	Verdadeira
0%	100%	Falsa

Para efeitos de cálculo, vamos considerar que exista a informação que a causa C47 possui probabilidade de 70% de ser verdadeira. Como a única possibilidade de CE ocorrer é se C47 ocorrer, CE herda a probabilidade do pai C47 e passa a ter probabilidade inicial de 70% de acontecer. Agora vamos para um exemplo mais elaborado.

De acordo com o trabalho de Doro (2012), o defeito “componente incorreto” (CI) possui duas causas possíveis: “programação incorreta” da insersora de componentes (C47) e “alimentação incorreta do componente (tipo, código ou valor)” (C48). A rede bayesiana desse relacionamento é mostrada na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Exemplo de rede para o defeito “componente incorreto”



Sendo as causas C47 e C48 os únicos motivos para o aparecimento do defeito CI, assume-se que se o defeito CI for detectado então pelo menos uma das duas causas aconteceu, ou seja, existe 50% de probabilidade de uma das duas causas ser verdadeira. E se o defeito não foi identificado então nenhuma das duas causas aconteceu e elas possuem 100% de probabilidade de serem falsas. Essa relação é mostrada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Tabela de probabilidades do defeito “componente incorreto”

CI Presente	CI Ausente	C47	C48
100%	0%	Verdadeira	Verdadeira
50%	50%	Verdadeira	Falsa
50%	50%	Falsa	Verdadeira
0%	100%	Falsa	Falsa

Porém, como descobrir qual causa possui maior probabilidade de ser a verdadeira dado que o defeito CI aconteceu? A partir do cálculo bayesiano.

Para efeitos de exemplo do cálculo bayesiano, consideremos que o defeito CI aconteceu e que a probabilidade inicial da causa C47 acontecer é 70% e da C48 acontecer é 40%. A partir dessa informação, pode-se calcular a probabilidade da causa C47 ou C48 serem verdadeiras dado que o defeito CI aconteceu, a partir das probabilidades marginais citadas anteriormente. O cálculo da probabilidade da causa C47 acontecer é ilustrado na Figura 2.4.

Para chegar ao resultado é preciso calcular a probabilidade de cada uma das situações onde C47 é verdadeira e CI está presente e também todas as probabilidades de situações onde CI está presente,

independente da C47 ser verdadeira. No cálculo realizado, a probabilidade da C47 ser verdadeira dado que CI está presente é de 89,10%.

Figura 2.4 - Cálculo da probabilidade da C47 ser verdadeira dado que CI está presente

$$P(C47_V|CI_P) = \frac{P(C47_V, C48_V, CI_P) + P(C47_V, C48_F, CI_P)}{P(C47_V, C48_V, CI_P) + P(C47_V, C48_F, CI_P) + P(C47_F, C48_V, CI_P) + P(C47_F, C48_F, CI_P)}$$

$$P(C47_V, C48_V, CI_P) = 0,7 \times 0,4 \times 1 = 0,28$$

$$P(C47_V, C48_F, CI_P) = 0,7 \times 0,6 \times 0,5 = 0,21$$

$$P(C47_F, C48_V, CI_P) = 0,3 \times 0,4 \times 0,5 = 0,06$$

$$P(C47_F, C48_F, CI_P) = 0,3 \times 0,6 \times 0 = 0$$

$$P(C47_V|CI_P) = \frac{0,28 + 0,21}{0,28 + 0,21 + 0,06 + 0} = \frac{0,49}{0,55} = 0,891$$

O cálculo da probabilidade da causa C48 ser verdadeira dado que CI está presente é feito a partir do mesmo raciocínio e está mostrado na Figura 2.5.

Dessa vez, é preciso calcular a probabilidade de cada uma das situações onde a C48 é verdadeira e CI está presente e também todas as probabilidades de situações onde CI está presente, independente da C48 ser verdadeira. No cálculo realizado, a probabilidade da C48 ser verdadeira dado que CI está presente é de 61,80%.

Figura 2.5 - Cálculo da probabilidade da C48 ser verdadeira dado que CI está presente

$$P(C48_V|CI_P) = \frac{P(C47_V, C48_V, CI_P) + P(C47_F, C48_V, CI_P)}{P(C47_V, C48_V, CI_P) + P(C47_V, C48_F, CI_P) + P(C47_F, C48_V, CI_P) + P(C47_F, C48_F, CI_P)}$$

$$P(C47_V, C48_V, CI_P) = 0,7 \times 0,4 \times 1 = 0,28$$

$$P(C47_V, C48_F, CI_P) = 0,7 \times 0,6 \times 0,5 = 0,21$$

$$P(C47_F, C48_V, CI_P) = 0,3 \times 0,4 \times 0,5 = 0,06$$

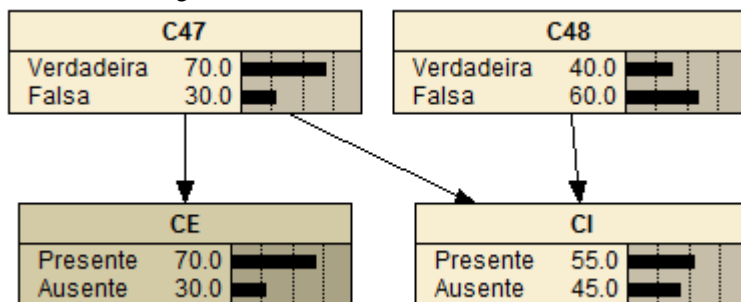
$$P(C47_F, C48_F, CI_P) = 0,3 \times 0,6 \times 0 = 0$$

$$P(C48_V|CI_P) = \frac{0,28 + 0,06}{0,28 + 0,21 + 0,06 + 0} = \frac{0,34}{0,55} = 0,618$$



Os defeitos utilizados nos exemplos anteriores possuem uma causa em comum: C47. Isso permite que os dois defeitos sejam colocados em uma única rede, como mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Redes dos defeitos CE e CI mescladas



E se os dois defeitos CE e CI ocorrerem simultaneamente? O que acontece com as probabilidades anteriores? O cálculo da probabilidade atualizada da causa C47 nesse caso é mostrado na Figura 2.7.

O raciocínio para a realização do cálculo é o mesmo da situação anterior, porém agora deve ser acrescentada ao cálculo a probabilidade de CE estar presente também. Portanto, é calculada a probabilidade de cada situação onde C47 é verdadeira e CE e CI estão presentes. O resultado é que a probabilidade da C47 ser verdadeira quando CE e CI estão presentes é de 100%.

Figura 2.7 - Cálculo da probabilidade da C47 ser verdadeira dado que CI e CE estão presentes

$$P(C47_V | CI_P CE_P) = \frac{P(C47_V, C48_V, CI_P, CE_P) + P(C47_V, C48_F, CI_P, CE_P)}{P(C47_V, C48_V, CI_P, CE_P) + P(C47_V, C48_F, CI_P, CE_P) + P(C47_F, C48_V, CI_P, CE_P) + P(C47_F, C48_F, CI_P, CE_P)}$$

$$P(C47_V, C48_V, CI_P, CE_P) = 0,7 \times 0,4 \times 1 \times 1 = 0,28$$

$$P(C47_V, C48_F, CI_P, CE_P) = 0,7 \times 0,6 \times 0,5 \times 1 = 0,21$$

$$P(C47_F, C48_V, CI_P, CE_P) = 0,3 \times 0,4 \times 0,5 \times 0 = 0$$

$$P(C47_F, C48_F, CI_P, CE_P) = 0,3 \times 0,6 \times 0 \times 0 = 0$$

$$P(C47_V | CI_P CE_P) = \frac{0,28 + 0,21}{0,28 + 0,21 + 0 + 0} = \frac{0,49}{0,49} = 1$$

O cálculo da probabilidade da causa C48 ser verdadeira dado que CI e CE estão presentes é feito a partir do mesmo raciocínio e está apresentado na Figura 2.8.

Dessa vez, é preciso calcular a probabilidade de cada uma das situações onde C48 é verdadeira e CE e CI estão presentes e também todas as probabilidades de situações onde CE e CI estão presentes, independente da C48 ser verdadeira. No cálculo realizado, a probabilidade da C48 ser verdadeira dado que CE e CI estão presentes caiu para 57,10%.

Figura 2.8 - Cálculo da probabilidade da C48 ser verdadeira dado que CI e CE estão presentes

$$P(C48_v | CI_p CE_p) = \frac{P(C47_v, C48_v, CI_p, CE_p) + P(C47_F, C48_v, CI_p, CE_p)}{P(C47_v, C48_v, CI_p, CE_p) + P(C47_v, C48_F, CI_p, CE_p) + P(C47_F, C48_v, CI_p, CE_p) + P(C47_F, C48_F, CI_p, CE_p)}$$

$$P(C47_v, C48_v, CI_p, CE_p) = 0,7 \times 0,4 \times 1 \times 1 = 0,28$$

$$P(C47_v, C48_F, CI_p, CE_p) = 0,7 \times 0,6 \times 0,5 \times 1 = 0,21$$

$$P(C47_F, C48_v, CI_p, CE_p) = 0,3 \times 0,4 \times 0,5 \times 0 = 0$$

$$P(C47_F, C48_F, CI_p, CE_p) = 0,3 \times 0,6 \times 0 \times 0 = 0$$

$$P(C48_v | CI_p CE_p) = \frac{0,28 + 0}{0,28 + 0,21 + 0 + 0} = \frac{0,28}{0,49} = 0,571$$

Uma das vantagens da utilização de redes bayesianas é que a representação de um conhecimento através de arcos e de probabilidades é mais simples do que a utilização de métodos mais abstratos como redes neurais.

Além disso, as redes bayesianas não necessitam de treinamento caso sejam utilizadas probabilidades diretas, mas elas também permitem a utilização de dados históricos para o aprendizado da base de dados (redes dinâmicas). Os algoritmos de aprendizagem de redes bayesianas permitem que as relações de dependência e as probabilidades condicionais sejam encontradas a partir da informação obtida em um banco de dados, o que facilita a criação da rede bayesiana (LEE e ABBOTT, 2003).

Um exemplo de utilização de redes bayesianas voltadas para o controle da qualidade é o sistema criado por Doro, Donatelli e Schneider (2009). Eles desenvolveram e implantaram um sistema especialista baseado em redes Bayesianas para dar suporte ao planejamento da inspeção da produção em pequenos lotes de PCI a partir da previsão da qualidade de um determinado lote a partir dos controles aplicados no processo.

Na rede criada existem vários controles possíveis de serem aplicados em um processo, como por exemplo, um sistema de inspeção visual da aplicação de pasta de solda e um sistema de inspeção da inserção de componentes.

Para cada um desses controles existem possibilidades de configurações diferentes, como por exemplo, um controle de inspeção de pasta de solda pode ter um conjunto de parâmetros de inspeção mais rígidos e um conjunto de parâmetros mais flexível. A saída desse sistema é a previsão da qualidade de um determinado lote.

A obtenção das probabilidades da rede foi realizada através de um algoritmo de aprendizado aplicado em uma base de dados que continha os controles utilizados, seus respectivos parâmetros e o resultado da qualidade medida no final do processo.

O sistema foi construído utilizando Delphi, banco de dados *Firebird* e a ferramenta Netica.

Han, Li e Xu (2008) desenvolveram um sistema especialista para diagnóstico de falhas em uma linha de produção de *chipsets* para permitir suporte à decisão para manutenção de máquinas utilizando redes bayesianas.

A relação causal entre sintomas de máquinas e suas causas foi obtida através de um questionário em formato de tabela de tamanho  $M \times N$ , onde  $M$  é o número de sintomas e  $N$  é o número de causas possíveis.

O questionário foi enviado a diversos especialistas que os preencheram com os valores: impossível, improvável, incerto, cinquenta-cinquenta, esperado, provável e certo, que foram convertidos em probabilidades baseadas na tabela de correspondência criada por Renooij e Witteman (1999).

Esses dados foram utilizados como probabilidades condicionais para o preenchimento da rede bayesiana, que foi estruturada da seguinte forma: cada sintoma é um nodo filho cujo pai é um nodo causa.

Esse sistema foi aplicado em uma linha de produção de *chipsets* e os resultados mostraram que ele realiza o suporte à tomada de decisão corretamente.

No capítulo seguinte é realizada a especificação e análise do problema, a definição das ferramentas utilizadas, a modelagem da rede bayesiana, a modelagem da interação entre a solução proposta e a linha de produção utilizada como estudo de caso e por fim é detalhado o desenvolvimento do sistema proposto como solução.



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 ESPECIFICAÇÃO E ANÁLISE DO PROBLEMA

O sistema precisa ser flexível para atender aos requisitos do projeto COGMET (PFEIFER, SCHMITT, *et al.*, 2010), por isso foi escolhido o paradigma de sistemas multiagentes para a criação do sistema.

O sistema precisa melhorar o diagnóstico de defeitos, para isso foi tomado como base as características de diagnóstico dos trabalhos de Doro (2009) e de Vargas (2012).

Foi observado que o trabalho de Doro (2009) realizava o diagnóstico de apenas um defeito por vez. Já o sistema de Vargas (2012) realiza o diagnóstico de vários defeitos por vez, porém ele analisa os defeitos individualmente e gera como resposta uma lista pré-definida de todas as causas possíveis para cada defeito.

A partir daí, foi definido como meta que o sistema proposto neste trabalho deveria realizar a análise dos defeitos em conjunto, pois em uma produção de placas de circuito impresso é comum acontecer mais de um defeito por placa e esses defeitos geralmente têm relação entre si.

A base de dados que a empresa possuía e que deveria ser utilizada como base de conhecimento do sistema de diagnóstico é a tabela que demonstra a relação causa-defeito em PCI criada por Doro (2012).








Nesse trabalho foi criada uma tabela que estabelece uma relação de impacto entre 27 defeitos que podem ocorrer durante um processo de montagem de placas de circuito impresso utilizando tecnologia SMT e 69 causas potenciais, considerando o processo de soldagem por refusão. Essas causas foram classificadas como de baixo, médio e alto impacto, indicados respectivamente pelos pesos 1, 2 e 3, sendo que quanto maior o peso, maior é a chance daquela causa produzir o defeito observado. Um corte dessa tabela é mostrado na Figura 3.1.

De acordo com a análise do modelo de base de dados oferecido pela empresa, foi escolhida como técnica para motor de inferência do sistema de diagnóstico a utilização de redes bayesianas.

Essa técnica foi escolhida, pois não havia informações sobre o histórico da produção, o que impossibilita a utilização de técnicas como redes neurais e também não havia a possibilidade de um trabalho completo de entrevista com especialistas com o objetivo de coletar mais dados.

Além disso, modelo de representação de dados da tabela relação causa-defeitos disponibilizada pela empresa pode ser facilmente adaptados para probabilidades, que é o requisito principal para a utilização de redes bayesianas. E o raciocínio utilizado pelas redes bayesianas é de fácil explicação para o entendimento de colaboradores da empresa que são leigos em técnicas de inteligência artificial entenderem como funciona o sistema.

Figura 3.1- Corte da Tabela de relação causa-defeito.

		Defeito	Pasta de solda desalinhada (Misaligned solder paste)	Excesso de pasta de solda (Excess solder paste)	Falta de pasta de solda (missing solder paste)	Pasta de solda borrada (Slump solder paste)
		Exemplo				
		Descrição	Pasta de solda desalinhada com os pads da placa	Volume excessivo de pasta de solda	Área ou volume insuficiente de pasta de solda	A pasta de solda não é aplicada uniformemente nos pads da placa
Causa potencial			1	2	3	4
 Máscara de solda desalinhada	5		1	1	1	1
	6	 Deflexão excessiva da placa de circuito impresso	2	3	3	2
	7	 Placa de circuito impresso suja	1		2	2

Fonte: Doro (2012)

3.2 FERRAMENTAS UTILIZADAS

A estrutura da rede bayesiana foi modelada e construída utilizando o Software Netica (Norsys Software Corporation, 2012).

O Netica é uma ferramenta amplamente utilizada para o ensino de redes bayesianas devido à sua interface gráfica de fácil manuseio, além de ser utilizado em diversas publicações como sistema de diagnóstico.

Por exemplo, Tian, Liu *et al.* (2014) utilizaram o Netica para a criação de um sistema de diagnóstico de defeitos em robôs utilizados para o corte de carcaças submarinas e Cai, Liu *et al.* (CAI, LIU, *et al.*, 2014) desenvolveram um sistema de diagnóstico para defeitos simultâneos múltiplos em bombas de calor geotérmicas.

Além disso, o software foi escolhido por possuir a disponibilidade de uma API Java para posterior integração da rede bayesiana com os agentes.

Para a criação dos agentes foi utilizado o framework *open source* JADE (*Java Agent Development Framework*) (JADE, 2013) (BELLIFEMINE, POGGI e RIMASSA, 1999).

O JADE possibilita a utilização das especificações FIPA para comunicação entre os agentes, permitindo, assim, a integração entre agentes construídos em diferentes plataformas como, por exemplo, agentes criados utilizando o interpretador JASON.

Agentes desenvolvidos com o JADE têm sido utilizados em sistemas de diagnósticos, um exemplo recente disso é o trabalho de Carrera, Iglesias *et al.* (2014), que integra as técnicas de agentes e redes bayesianas para o desenvolvimento de um sistema multiagente de diagnóstico de defeitos em um sistema de gerenciamento de serviço de internet na República Tcheca.

### 3.3 O SISTEMA

#### 3.3.1 Modelagem das redes bayesianas

No trabalho de Doro (2012), o processo de montagem e os defeitos que podem ocorrer foram classificados em três partes: defeitos que podem ocorrer durante a aplicação de pasta de solda, defeitos que podem ocorrer durante a inserção de componentes e defeito que podem ocorrer durante ou após a soldagem por refusão.

Poderia ser criada uma rede bayesiana única que contemplasse todas as causas e todos os defeitos e assim seria necessária a criação de apenas um agente que realizasse o diagnóstico de todas as máquinas.

Porém, optou-se por utilizar a classificação de Doro (2012) e realizar a divisão dos defeitos em redes diferentes. Essa opção foi escolhida por um conjunto de razões explicadas em seguida.

Primeiramente, a divisão em três redes permite uma melhor visualização dos relacionamentos entre causa e defeito.

Em segundo lugar, existem defeitos iguais que podem ocorrer em etapas diferentes, como, por exemplo, os defeitos “componente trincado”, “componente desalinhado” e “componente faltando”, que podem ocorrer após a inserção de componentes ou após o forno de refusão e dependendo da etapa onde eles foram identificados as causas raízes desses defeitos mudam.

Por último, a divisão do trabalho em três agentes, cada um especializado em um tipo de diagnóstico, diminui a formação de filas, pois se três máquinas, localizadas em diferentes etapas do processo, realizarem a inspeção e encontrarem defeitos, elas precisarão fazer fila para que o agente central diagnostique uma a uma.

Com a utilização de três agentes especializados no diagnóstico de um tipo de processo essa fila não existiria, pois cada máquina é auxiliada por um agente diferente.

Assim, para cada etapa do processo de montagem de uma PCI foi criada uma rede bayesiana para identificar as causas prováveis de um defeito relacionado a um dos processos de montagem.

Foram criadas redes independentes, uma para os defeitos e causas relacionados à aplicação de pasta de solda, outra para defeitos e causas relacionados ao processo de inserção de componentes e uma terceira rede que possui as informações relacionadas aos defeitos e causas do processo de soldagem por refusão.

As redes foram modeladas utilizando a interface gráfica do Netica. Como os nomes das causas e defeitos são extensos, foram utilizadas siglas para o preenchimento da rede bayesiana.

As siglas utilizadas como referência aos defeitos estão descritas no Anexo A e as siglas utilizadas como referência às causas estão descritas no Anexo B.

Assim, foram criadas três redes Bayesianas e a primeira delas foi a rede da insersora de componentes. Existem oito tipos de defeitos relacionados à inserção de componentes.

Na Tabela 3.1 estão relacionados os defeitos, o número de causas e o número de probabilidades condicionais que devem ser determinadas para o preenchimento da tabela de probabilidades de cada defeito. O cálculo do número de probabilidades e da tabela de probabilidades é mostrado no item 3.3.2.

É importante lembrar que a coluna “Número de causas possíveis relacionadas a cada defeito” não mostra a quantidade de causas diferentes presentes nesta rede, e sim apenas a quantidade de causas que são “pais” de cada defeito, ou seja, que possuem uma seta da causa em direção a um defeito.

Essa seta pode ir de uma causa para vários defeitos, o que significa que os defeitos possuem causas em comum.

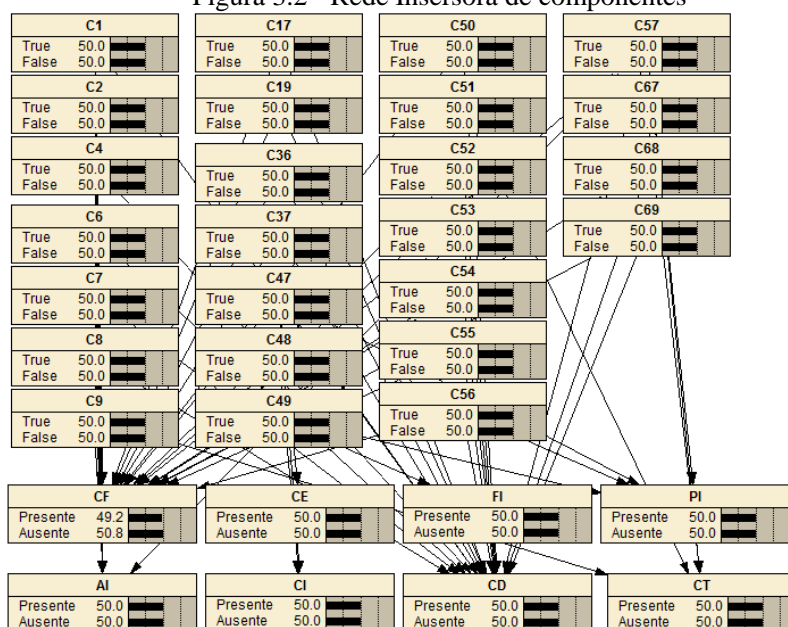


Tabela 3.1 - Dados da rede da Inserora de componentes

Defeito	Número de causas possíveis relacionadas a cada defeito	Número de probabilidades condicionais
Componente faltando	21	2.097.152
Componente extra	1	2
Face invertida	1	2
Posição incorreta	4	16
Altura incorreta	8	256
Componente incorreto	2	4
Componente desalinhado	19	524.288
Componente trincado	4	16

No total, a rede bayesiana da inserora de componentes possui em sua estrutura 25 diferentes causas cadastradas, mas nem todas as causas estão relacionadas à todos os defeitos, como falado anteriormente. A estrutura dessa rede é mostrada na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Rede Inserora de componentes



Devido à utilização de aproximações nos cálculos das probabilidades (explicado mais a frente no item 3.3.2), as probabilidades iniciais podem ter diferença de até 2%.

As probabilidades iniciais tendem a ser igual a 50% pois não existem dados que relatem a probabilidade de ocorrência dos defeitos e causas, por isso assume-se que todos os defeitos e todas as causas possuem probabilidade inicial de 50% de acontecerem.

Utilizando a tabela da insersora de componentes como exemplo, é feito o cálculo da quantidade de dados a ser tratada por uma rede bayesiana.

Uma linha simples de uma tabela de probabilidades utiliza em média 15 bytes. Somando todas as linhas da Tabela 3.1 e multiplicando por 15, obtemos um total de 39.326.040 bytes, o equivalente a aproximadamente 37,5 MB. Esse é o tamanho de uma tabela de probabilidades pura.

Porém, o software utilizado ainda acrescenta comentários de configuração para cada tabela de probabilidade. Esses comentários aumentam o tamanho do arquivo na ordem de 10 vezes do seu tamanho original. Sendo assim o arquivo contendo as tabelas de probabilidade da rede insersora teria em média 375MB.

Comparando com o tamanho do arquivo contendo apenas as tabelas com seus comentários de configuração, o arquivo real da rede de insersora possui 401MB, compatível com o cálculo feito. Além dos comentários de configuração, ainda deve ser acrescentados ao arquivo dados concretos de configuração da rede. Considerando todos os dados de configuração, o arquivo real da rede insersora possui 470MB.

Esse arquivo é carregado na memória, o que não é problema em um computador com 4GB de memória RAM, porém, isso é um problema para redes maiores.

A segunda rede criada foi a rede da aplicadora de pasta de solda. A Tabela 3.2 mostra os quatro tipos de defeitos relacionados à aplicação de pasta de solda, a quantidade de causas relacionadas para cada defeito e a quantidade de linhas da tabela de probabilidades.

No caso da rede da aplicadora de pasta de solda, devido ao grande número de possíveis causas dos defeitos “falta de pasta de solda” e “pasta de solda borrada”, os dois não puderam ser implementados por causa da pouca capacidade de processamento computacional da máquina utilizada para criar e rodar a rede, pois o arquivo contendo a tabela de probabilidades ficaria muito grande.

Tabela 3.2 - Dados da rede da Aplicadora de pasta de solda

Defeito	Número de causas possíveis	Número de probabilidades condicionais
Pasta de solda desalinhada	12	4.096
Excesso de pasta de solda	21	2.097.152
Falta de pasta de solda	24	16.777.216
Pasta de solda borrada	28	268.435.456

Fazendo para a rede da aplicadora o mesmo cálculo feito para a rede da insersora, o tamanho estimado do arquivo contendo todas as quatro tabelas de probabilidades com os comentários de configuração e sem levar em conta o acréscimo de dados concretos de configuração, seria de no mínimo 40,2 GB, como mostrado na Tabela 3.3.

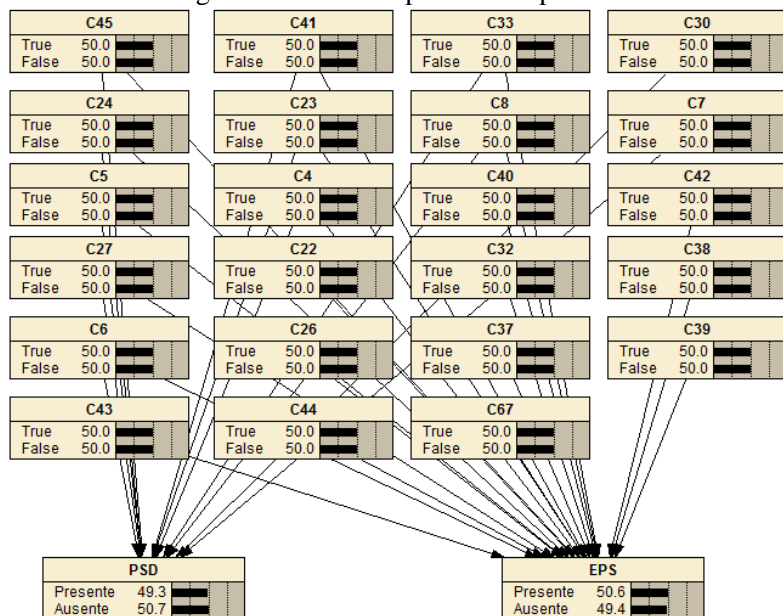
Tabela 3.3 - Cálculo do tamanho do arquivo da rede impressora de pasta de solda

Defeito	Pasta de solda desalinhada	Excesso de pasta de solda	Falta de pasta de solda	Pasta de solda borrada
Número de causas possíveis	12	21	24	28
Número de linhas da tabela de probabilidades	4.096	$\sim 2,097 \times 10^6$	$\sim 16,78 \times 10^6$	$\sim 268,4 \times 10^6$
Tamanho da tabela simples	60KB	30MB	240MB	3,75GB
Tamanho da tabela com comentários de configuração	600KB	300MB	2,4GB	37,5GB
Tamanho total do arquivo	40,2GB			

Como o programa utilizado para a criação das redes carrega as tabelas de probabilidades na memória RAM, devido à grande quantidade de dados a serem tratados e às limitações computacionais mostradas, a rede bayesiana da impressora de pasta de solda contém

apenas dois defeitos (pasta de solda desalinhada e excesso de pasta de solda) e 23 diferentes causas possíveis, pois os defeitos “falta de pasta de solda” e “pasta de solda borrada” não puderam ser implementados, conforme mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Rede impressora de pasta de solda



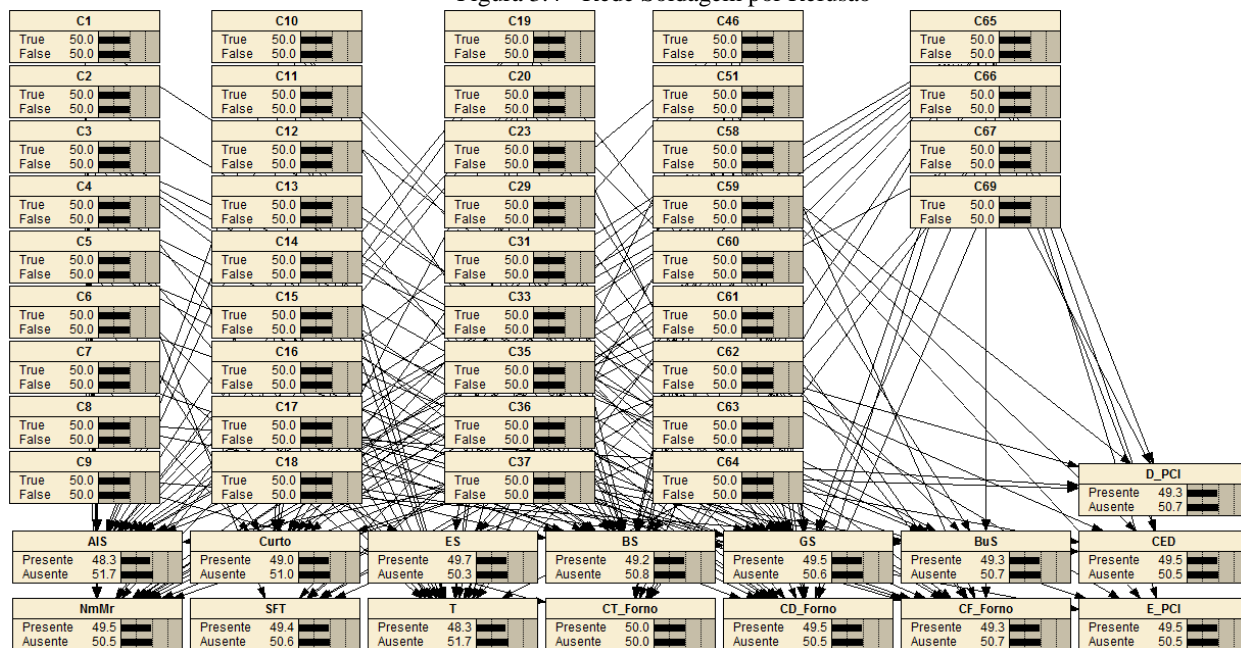
A terceira e última rede criada é a Rede do forno de refusão. Essa rede possui quinze possíveis defeitos, detalhados na Tabela 3.4, e possui 40 possíveis causas. Sua estrutura é mostrada na Figura 3.4.

Com as redes criadas e as tabelas preenchidas, foram feitos testes para verificar o correto funcionamento da rede. Esses testes foram feitos a partir da simulação da ocorrência de defeitos em placas, observando a resposta da rede e comparando com a tabela criada por Doro (2012).

Tabela 3.4 - Dados da rede do Forno de refusão

Defeito	Número de causas possíveis	Número de probabilidades condicionais
Ausência e insuficiência de solda	22	4.194.304
Curto	11	2.048
Excesso de solda	4	16
Bolas de solda	19	524.288
Gota de solda	19	524.288
Buraco na solda	9	512
Não Molhagem / Molhagem retrocedida	14	16.384
Solda fria ou trincada	7	128
Tombstone	20	1.048.576
Componente trincado	7	128
Componente desalinhado	14	16.384
Componente faltando	12	4.096
Componente eletricamente defeituoso	6	64
Empenamento da PCI	5	32
Delaminação da PCI	6	64

Figura 3.4 - Rede Soldagem por Refusão



### 3.3.2 Tabelas de probabilidades e seus cálculos

O número de probabilidades condicionais que devem ser determinadas para cada nodo representando um defeito é definido pelo número de pais que esse nodo possui, ou seja, pelo número de causas relacionadas com esse defeito (HAN, LI e XU, 2008), e pelo número de estados desses nodos pais (QUEIROZ, 2008). Esse valor cresce exponencialmente.

O cálculo do tamanho da tabela de probabilidades de um defeito com pais que possuem apenas estados binários é realizado através da Eq. 5, onde  $X$  é o número de nodos pais (causas possíveis) de um determinado nodo de defeito.

$$\text{Número de probabilidades condicionais} = 2^X \quad (5)$$

Assim, se um defeito possui quatro causas possíveis então dezesseis probabilidades condicionais devem ser determinadas ( $2^4$ ). Se todos os nodos pais tivessem três estados, esse número subiria para 81 ( $3^4$ ). Por esse motivo e pela falta de necessidade de um número maior de estados para as variáveis do tipo causa, foram utilizados apenas dois estados (*True* e *False*).

Um exemplo de tabela de probabilidades condicionais é ilustrado na Figura 3.5. Essa é a tabela de probabilidades do defeito “excesso de solda” (ES), que faz parte da rede do forno de refusão.

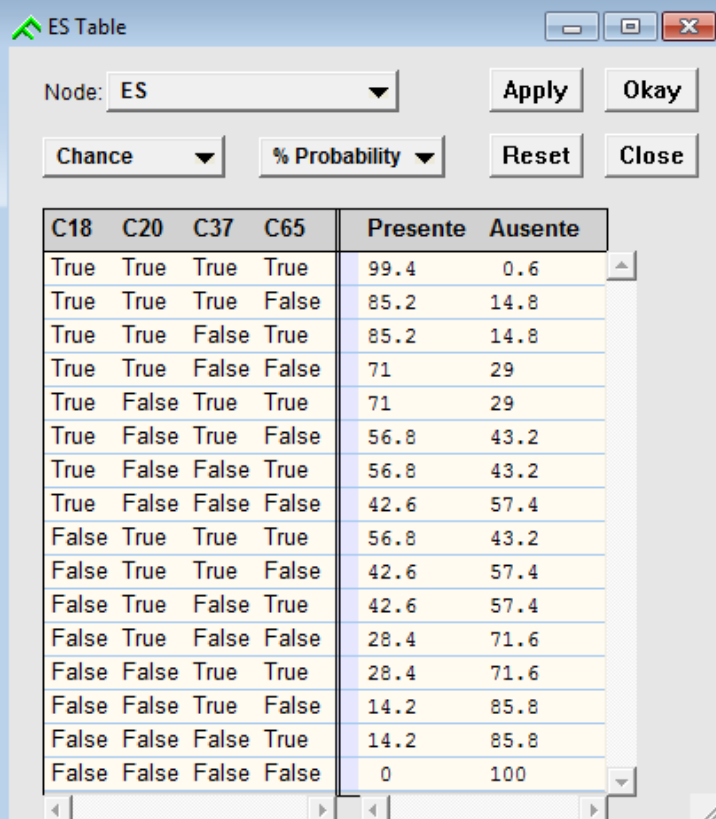
Esse defeito possui quatro causas possíveis, “impressão de pasta de solda em excesso” (C18), “impressão de pasta de solda borrada” (C20), “pasta de solda expirou sua vida útil ou deteriorou” (C37) e “funcionamento inadequado do forno de refusão” (C65). Utilizando a Eq. 5, citada anteriormente, a tabela desse nodo precisa de dezesseis probabilidades condicionais ( $2^4$ ).

Essa tabela cresce exponencialmente conforme o número de causas que um defeito tem, tornando inviável o seu preenchimento manual nos casos onde um defeito possui 21 causas, o que gera a necessidade de preencher 2.097.152 ( $2^{21}$ ) probabilidades, como no caso do defeito “componente faltando” mostrado anteriormente na Tabela 3.1.

Para resolver esse problema, foi criado um programa em Java para realizar o preenchimento dessas tabelas automaticamente. Esse preenchimento foi realizado a partir do arquivo “.dne” gerado pelo

aplicativo Netica, que é um arquivo de texto contendo toda a estrutura da rede e de suas tabelas de probabilidades.

Figura 3.5 - Exemplo de tabela de probabilidades condicionais do defeito “excesso de solda” (ES)



C18	C20	C37	C65	Presente	Ausente
True	True	True	True	99.4	0.6
True	True	True	False	85.2	14.8
True	True	False	True	85.2	14.8
True	True	False	False	71	29
True	False	True	True	71	29
True	False	True	False	56.8	43.2
True	False	False	True	56.8	43.2
True	False	False	False	42.6	57.4
False	True	True	True	56.8	43.2
False	True	True	False	42.6	57.4
False	True	False	True	42.6	57.4
False	True	False	False	28.4	71.6
False	False	True	True	28.4	71.6
False	False	True	False	14.2	85.8
False	False	False	True	14.2	85.8
False	False	False	False	0	100

O programa analisa linha a linha a tabela verdade contida no arquivo “.dne” e para cada linha é realizado o processo seguinte:

Cada coluna possui no seu cabeçalho o nome de uma causa que é relacionada ao defeito cuja tabela será calculada. O conteúdo dessa célula é um valor *true* ou *false*. Se uma causa possui valor *false*, o programa desconsidera essa causa e passa para a próxima célula (coluna) dessa linha.

Se uma causa tem valor *true* em uma determinada célula da tabela, então o programa verifica qual o nível de impacto dessa causa e



o respectivo valor de probabilidade que ela possui. O cálculo do valor de probabilidade para cada causa é mostrado mais adiante.

Para cada causa listada como *true*, os valores obtidos são somados e armazenados em uma variável. Ao final da análise da linha esse somatório é utilizado para o preenchimento da entrada correspondente à probabilidade do defeito estar presente (coluna “Presente”).

A probabilidade de o defeito estar ausente (coluna “Ausente”) é calculada pela diferença entre 100 e o valor somado, pois a soma da probabilidade de um defeito estar presente com a probabilidade de o defeito estar ausente deve resultar em 100%.

Por exemplo, se o somatório obtido em uma linha é 80, então a probabilidade de um defeito estar presente é de 80% e do defeito estar ausente é 20%, dado a observação da configuração do estado das causas presentes naquela linha da tabela. Esse processo é repetido linha a linha até que a tabela inteira seja completamente processada e preenchida.

Para o preenchimento das tabelas de probabilidades foi necessário quantificar em probabilidades o impacto que cada causa exerce sobre um defeito.

Para isso foi criada uma heurística que foi dividida em três etapas: quantização, somatório e proporcionalidade, descritas em seguida.

Na etapa de quantização, o objetivo é quantizar a tabela de relação causa-defeito de Doro (2012). Primeiramente são obtidos os valores encontrados nessa tabela. Como mostrado anteriormente, as causas de um defeito podem ser classificadas com baixo, médio e alto impacto.

Essas causas foram quantificadas da seguinte maneira: baixo impacto = 1, médio impacto = 2 e alto impacto = 3. Esses valores foram escolhidos assumindo a premissa de que uma causa de médio impacto possui maior probabilidade de originar um defeito que uma causa de baixo impacto e, por sua vez, uma causa de alto impacto possui maior probabilidade de originar um defeito que uma de médio impacto.

Ou seja, quanto maior o impacto da causa, maior a probabilidade dessa causa resultar em um determinado defeito. A partir dessa lógica foi assumido que uma causa de médio impacto possui o dobro de chance de originar um defeito que uma causa de baixo impacto e que uma causa de alto impacto possui o triplo de chance de originar um defeito que uma causa de baixo impacto.

Esses valores foram assumidos de maneira proporcional para efeito de cálculo, uma vez que a relação causa-defeito precisa ser

quantizada para depois ter seus valores representados em forma de probabilidades de ocorrência de defeitos, necessárias para a criação da rede bayesiana.

Na segunda etapa (somatório), o objetivo é determinar um somatório de causas para cada defeito. Assim, para cada defeito foram somados os valores atribuídos para cada causa (baixo impacto = 1, médio impacto = 2 e alto impacto = 3) listada como relacionada a esse defeito (causas listadas, mas não relacionadas ao defeito não entram no cálculo), obtendo-se dessa forma um somatório para cada defeito listado na tabela.

É importante lembrar que os somatórios de cada defeito não assumem necessariamente os mesmo valores. Isso ocorre, pois o somatório depende do número de causas relacionadas a cada defeito e do peso de cada causa.

Por exemplo, uma causa C1 pode ser considerada de alto impacto para o defeito D1, mas ser considerada de baixo impacto para o defeito D2. Isso geraria uma diferença de dois pontos entre o somatório do defeito D1 e do defeito D2.

Na terceira etapa (proporcionalidade), o objetivo é obter os valores de probabilidade para cada causa em relação a um determinado defeito. Com o somatório obtido na etapa anterior é estabelecida uma relação de proporção entre o valor de cada causa em relação ao somatório do defeito.

Para isso foi assumido que o valor do somatório é proporcional a 100 e foi calculada a proporção de cada tipo de causa em relação ao somatório. O valor proporcional (VP) de uma causa é calculado conforme a Eq. 6.

$$VP = \frac{100}{\text{somatório}} \times \text{valor de impacto da causa} \quad (6)$$

Por exemplo, se o somatório de um determinado defeito tem o valor igual a 20, o valor proporcional de uma causa de baixo impacto é 5, conforme Eq. 7, enquanto que o valor proporcional de uma causa de alto impacto é 15, conforme Eq. 8.

$$VP = \frac{100}{20} \times 1 = 5 \quad (7)$$

$$VP = \frac{100}{20} \times 3 = 15 \quad (8)$$

Assumiu-se que o valor do somatório é igual a 100, pois este é o valor máximo que uma probabilidade pode assumir e assim, se todas as causas relacionadas com um determinado defeito estiverem presentes no processo de produção pode-se assumir que a probabilidade desse defeito ocorrer tende a 100%.

Utilizando a mesma lógica, a probabilidade de uma causa com alto impacto, acima calculada na Eq. 8, ter ocasionado um defeito seria de 15%. Como os valores de probabilidades são proporcionais ao impacto da causa, o valor de probabilidade de uma causa de médio impacto é de 10% e de baixo impacto é de 5%.

Os valores obtidos na terceira etapa são utilizados para o preenchimento da tabela de probabilidades de cada defeito. O resultado do cálculo dos valores proporcionais foi considerado até a segunda casa decimal, tornando o resultado do somatório aproximado de 100%. Por isso, pode existir uma variação de no máximo dois pontos entre as probabilidades.

### 3.3.3 Comunicação entre os agentes

O próximo passo foi a integração da rede bayesiana com o sistema multiagente. Utilizando o framework JADE foram criados três tipos de agentes: agente de máquina de inspeção, agente especialista e agente gerente de inspeção.

A comunicação e o relacionamento dos agentes no sistema são apresentados na Figura 3.6, onde os agentes especialistas, que são o principal foco deste trabalho, estão destacados com uma elipse.

Um agente do tipo de máquina de inspeção representa uma máquina de inspeção presente na linha de produção. Foram criados três agentes desse tipo: agente SPI, agente S2iAOI e agente AOI.

Cada um deles possui a única função de enviar os defeitos encontrados pela sua máquina inspeção para o seu respectivo agente especialista, por isso são considerados agentes reativos.

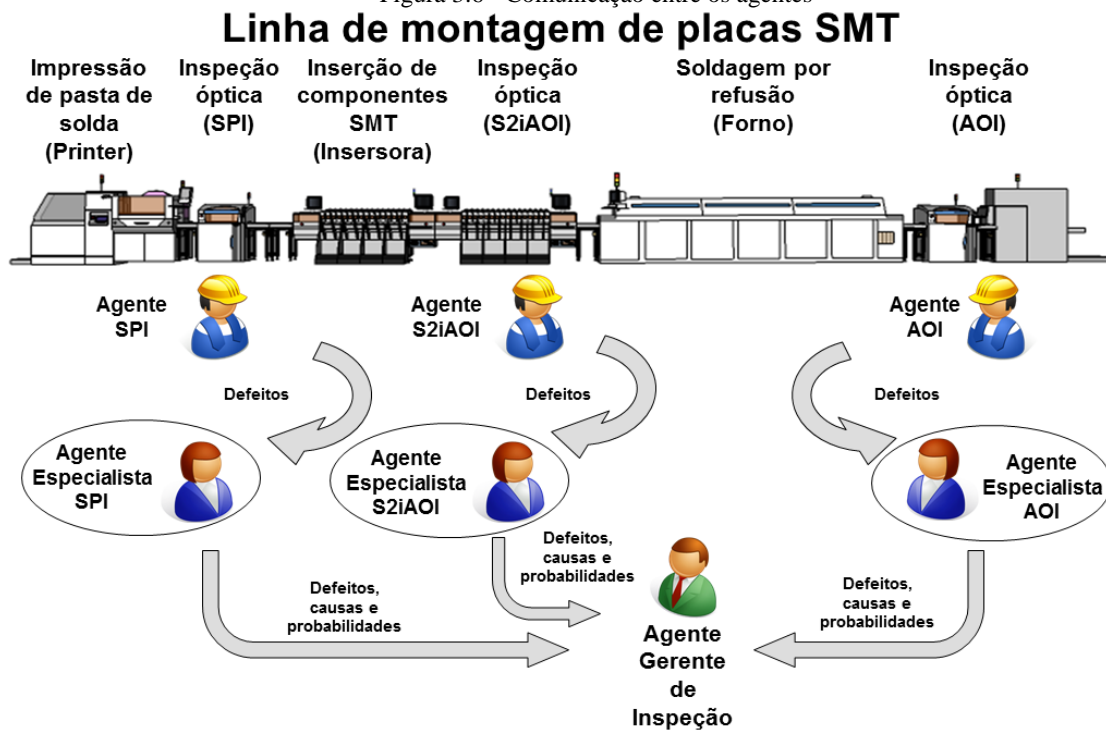
Os agentes de máquina de inspeção foram criados para simular o comportamento de interação entre os agentes especialistas e as máquinas de inspeção da linha de produção.

Assim, a obtenção dos defeitos é simulada, cabendo ao programador escolher quais defeitos serão enviados por esse agente.

O agente de máquina de inspeção envia uma mensagem para o agente especialista da sua máquina com o formato:

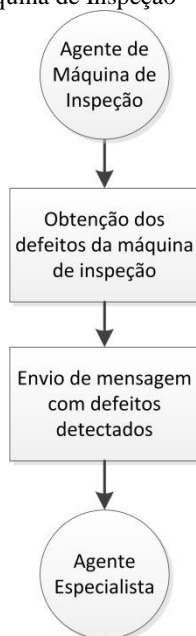
/Nomedamáquina/+Defeito1/+Defeito2/(...)/+DefeitoN

Figura 3.6 - Comunicação entre os agentes



O funcionamento geral do agente do tipo máquina de inspeção está apresentado na Figura 3.7, onde os círculos representam os agentes e os retângulos representam ações.

Figura 3.7 - Fluxograma Geral de Funcionamento dos Agentes de Máquina de Inspeção



Um agente do tipo especialista possui uma das três redes bayesianas criadas e representa um especialista em diagnosticar defeitos provenientes de certo processo de produção e enviar o resultado do diagnóstico para o agente gerente de inspeção.

A rede bayesiana foi incorporada ao agente através da API NeticaJ e do respectivo arquivo “.dne” gerado pelo software Netica após a modelagem das redes bayesianas mostradas no item 3.3.1.

Assim, para cada máquina de inspeção (agente de máquina de inspeção) existe um agente especialista, portanto foram criados três agentes especialistas: agente especialista SPI, agente especialista S2iAOI e agente especialista AOI.

Cada um desses agentes é capaz de manipular, extrair e utilizar as informações obtidas através de mensagens vindas dos agentes de máquinas de inspeção, por isso são considerados agentes cognitivos.

O agente especialista recebe a mensagem enviada pelo agente de máquina de inspeção, extrai os defeitos da mensagem e os insere como evidências na sua rede bayesiana, obtendo, ao final da adição de todos os defeitos, as três causas com maior probabilidade de serem a origem dos defeitos recebidos e detectados pelas máquinas de inspeção.

Essas causas são enviadas para o agente gerente de inspeção através de uma mensagem com o formato:

/Máquina/+Defeito1+(...)+DefeitoN/+Causa1\_Probabilidade1+  
Causa2\_Probabilidade2+ Causa3\_Probabilidade3

O funcionamento do agente do tipo especialista está apresentado na Figura 3.8. Nessa figura os círculos representam agentes, os retângulos representam ações e o hexágono representa um laço *for*.

Um agente do tipo gerente de inspeção representa um agente cuja função é receber o diagnóstico enviado pelos agentes especialistas e com base na resposta recebida tomar uma decisão sobre como agir no processo de produção de maneira a evitar que aqueles defeitos identificados pelos agentes de máquina de inspeção ocorram novamente.

Porém, é importante lembrar que tanto os agentes do tipo máquina de inspeção quanto o agente gerente de inspeção foram criados apenas para simulação do ambiente da linha de produção e do comportamento de interação entre os agentes.

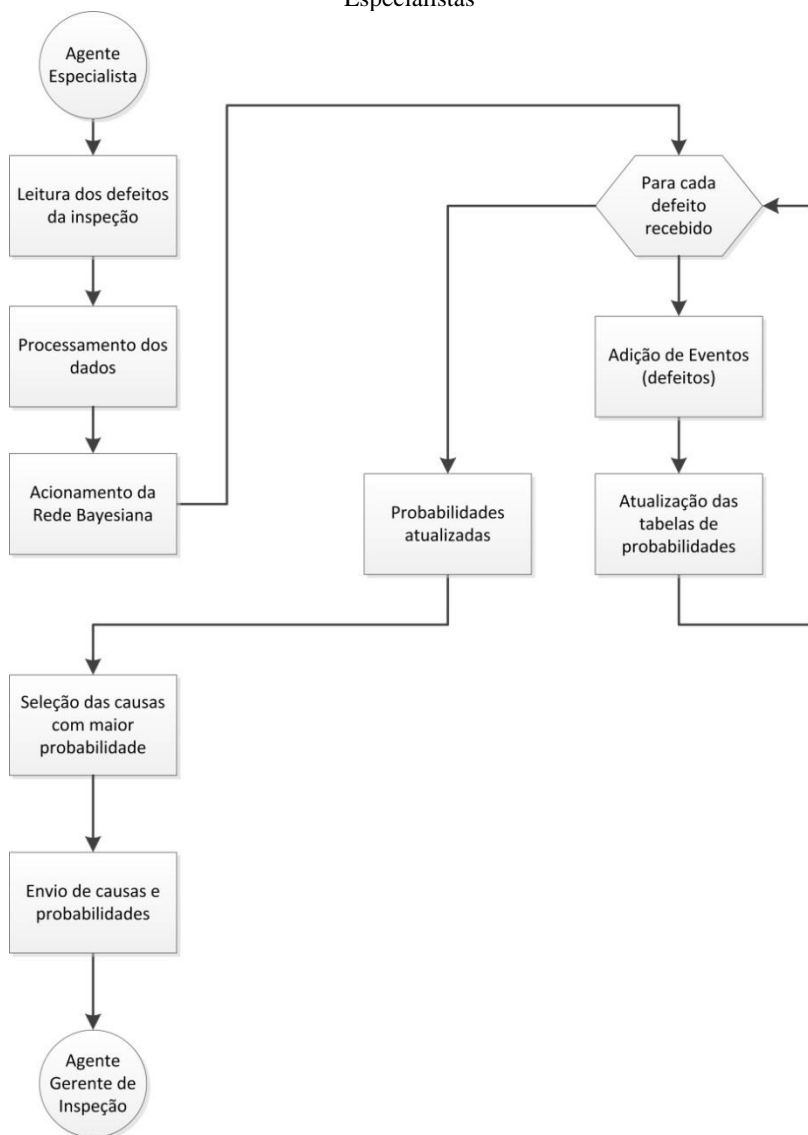
Esses agentes são desenvolvidos por outros pesquisadores dentro do projeto, e serão implementados como resultado final do projeto COGMET.

Por isso, o agente gerente de inspeção, que na proposta final é um agente classificado como cognitivo, aqui possui comportamento de agente reativo, sendo sua principal função apenas o recebimento do diagnóstico realizado pelos agentes especialistas e a apresentação desse resultado para o usuário em formato de probabilidades.

Assim, o agente gerente de inspeção separa os dados recebidos na mensagem enviada pelo agente especialista e apresenta para o usuário as seguintes informações: a máquina que identificou os defeitos, os defeitos recebidos, as causas recebidas e suas respectivas probabilidades.

No próximo capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados com o sistema.

Figura 3.8 - Fluxograma Geral de Funcionamento dos Agentes Especialistas







## 4 RESULTADOS

A partir da solução proposta para a detecção de possíveis fontes geradoras de defeitos e da implementação do sistema proposto foram elaborados diferentes testes para validar a abordagem e o sistema propostos.

É importante destacar que não foi utilizado um simulador, e sim foram realizados testes no sistema desenvolvido baseados em quatro cenários diferentes que representam uma simulação das possibilidades de detecção de defeitos que poderiam ocorrer em uma linha real de produção de placas de circuito impresso.

Os resultados obtidos foram comparados com o resultado que um humano escolheria através da análise da tabela de relacionamento causa-defeito de Doro (2012).

### 4.1 TESTES PROPOSTOS

Para avaliar a abordagem proposta e a sua funcionalidade, foram efetuados uma série de testes no sistema utilizando quatro cenários diferentes, que simulam as possibilidades de detecção que podem ocorrer em uma linha de produção, e agentes especialistas diversos.

Os seguintes cenários foram propostos:

- Um defeito recebido que possui apenas uma causa
- Um defeito recebido que possui múltiplas possibilidades de causas
- Múltiplos defeitos recebidos que possuem apenas uma causa em comum
- Múltiplos defeitos recebidos que possuem múltiplas possibilidades de causas

Para avaliar a resposta do sistema, para cada cenário proposto foi criada uma tabela de respostas esperadas pelo sistema. Essas respostas representam o que um ser humano escolheria como resposta tomando como base de conhecimento apenas a tabela de relacionamento causa-defeito de Doro (2012) apresentada no item 3.1.

Ou seja, qual a resposta um ser humano daria se fosse dito para ele quais defeitos foram detectados e fosse pedido que ele determinasse as três causas com maior probabilidade de serem a origem do defeito, tomando como único conhecimento sobre o assunto a tabela de causa-defeito de Doro (2012).

É importante lembrar que mesmo que apenas uma rede bayesiana esteja sendo utilizada para os cenários, todas as redes e seus respectivos agentes estão esperando receber uma mensagem comunicando um defeito para que possam iniciar seu processamento.

O resultado do sistema é mostrado através do log do sistema que mostra a comunicação entre os agentes envolvidos e o resultado do diagnóstico da rede bayesiana dos agentes especialistas.

#### **4.1.1 Cenário 1: um defeito com uma única causa**

No primeiro cenário é simulada a detecção de apenas um defeito pelas máquinas de inspeção e esse defeito possui apenas uma causa possível.

Para o exemplo, foi utilizado o defeito “face invertida” (cadastrado como FI), que é relacionado à inserção de componentes e cuja única causa possível de acordo com a tabela utilizada como fonte é “posição incorreta do componente na embalagem”, cadastrada como C49 no sistema.

Portanto, a resposta que o sistema deve dar é a causa C49 com a maior probabilidade. A Figura 4.1 mostra o resultado dessa simulação.

As primeiras linhas da imagem contêm mensagens de inicialização dos agentes.

Nas linhas 5 a 8 o agente da máquina de inspeção de inserção de componentes (AgenteS2iAOI) envia uma mensagem para o agente especialista que é responsável pelos defeitos ocorridos após a inserção e antes do forno de refusão (AgenteEspecialistaS2iAOI) contendo o defeito encontrado. A mensagem enviada pelo agente é mostrada na linha 8: /S2iAOI/+FI.

Considerando o protocolo apresentado no capítulo anterior, a mensagem informa para o agente especialista o nome da máquina que encontrou o defeito (S2iAOI) e o defeito propriamente dito FI, que corresponde ao defeito face invertida.

Nas linhas 10 a 12 o agente especialista confirma o recebimento da mensagem e adiciona o defeito recebido FI como uma evidência na sua rede bayesiana.

Após a adição da evidência as tabelas de probabilidades são atualizadas e com resultado dessa atualização são obtidas as três causas com maior probabilidade de terem originado o defeito FI, que são a causa C49, C1 e C2.

Figura 4.1 - Resultado da simulação do cenário 1

```

1  AgenteGerenteDeInspecao: inicializado!
2  AgenteS2iAOI: inicializado!
3  AgenteEspecialistaS2iAOI: inicializado!
4
5  AgenteS2iAOI: Defeitos encontrados.
6  AgenteS2iAOI: Enviando mensagem para AgenteEspecialistaS2iAOI
7  AgenteS2iAOI: Mensagem enviada para AgenteEspecialistaS2iAOI:
8  /S2iAOI/+FI
9
10 AgenteEspecialistaS2iAOI: Mensagem recebida: /S2iAOI/+FI
11 AgenteEspecialistaS2iAOI: Defeitos: +FI
12 AgenteEspecialistaS2iAOI: Adicionando evidência FI
13 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 1: C49 1.0
14 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 2: C1 0.5
15 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 3: C2 0.5
16 AgenteEspecialistaS2iAOI: AgenteGerenteDeInspecao encontrado.
17 Enviar resultado.
18 AgenteEspecialistaS2iAOI: Mensagem enviada para AgenteGerenteDeInspecao:
19 /S2iAOI/+FI/+C49_1.0+C1_0.5+C2_0.5
20
21 AgenteGerenteDeInspecao: Mensagem recebida:
22 /S2iAOI/+FI/+C49_1.0+C1_0.5+C2_0.5
23 AgenteGerenteDeInspecao: Maquina que identificou o defeito: S2iAOI
24 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: FI
25 AgenteGerenteDeInspecao: Número de causas recebidas: 3
26 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C49. Probabilidade: 100%
27 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C1. Probabilidade: 50%
28 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C2. Probabilidade: 50%
29 AgenteGerenteDeInspecao: Resposta final:
30 Causa: C49. Probabilidade: 100%

```

Essas três causas são enviadas para o agente gerente de inspeção nas linhas 16 a 19. O agente gerente de inspeção confirma o recebimento das causas nas linhas 21 e 22 e nas linhas 23 a 28 são mostrados os dados recebidos, no caso o nome da máquina que identificou os defeitos, o defeito identificado e o número de causas recebidas que são transformadas em porcentagens.

O agente gerente de inspeção recebeu três causas: C49 (Posição incorreta do componente na embalagem) com 100%, C1 e C2 com 50% cada.

Quando o agente gerente de inspeção recebe um resultado com 100% de probabilidade, resultados iguais ou abaixo de 50% são ignorados.

Isso acontece, pois inicialmente todas as causas têm 50% de chance de estarem presentes, e se após a inserção de evidências esse valor não aumentou ele pode ser ignorado pela grande diferença de porcentagens entre a primeira e a segunda causa. O resultado final é apresentado na linha 30.

Como o defeito FI (face invertida) possui somente uma possibilidade de causa, se um ser humano olhasse a tabela em busca da causa desse defeito só iria encontrar a causa C49 relacionada a ele e, portanto diria que essa causa possui 100% de probabilidade de ser a origem desse defeito, pois não existe mais nada que estivesse relacionado a esse defeito.

O agente especialista retornou exatamente a causa C49 como a causa com 100% de probabilidade de ter originado o defeito FI, portanto o resultado apresentado é compatível com o resultado esperado.

Ao comparar o resultado do sistema proposto com o resultado que o sistema de Vargas (2012) iria propor, pode-se concluir que o sistema atual não apresenta melhor eficácia que o sistema proposto por Vargas (2012), já que o sistema de Vargas (2012) também apresentaria como resposta apenas aquela única causa cadastrada.

Portanto, no caso de utilização do sistema apresentado em um cenário onde um só defeito foi detectado, porém esse defeito possui uma única possibilidade de causa, o sistema não apresenta ganhos ou perdas em relação ao sistema de Vargas (2012), e sim o mesmo desempenho quanto à resposta.

#### **4.1.2 Cenário 2: um defeito com múltiplas causas**

O segundo cenário apresenta a simulação do recebimento de apenas um defeito detectado pelas máquinas de inspeção e esse defeito possui mais de uma possibilidade de causa cadastrada na tabela.

Foi utilizado o defeito “ausência e insuficiência de pasta de solda” (AIS) para gerar a simulação, esse defeito faz parte da rede do forno de refusão. Analisando a tabela usada como fonte, esse defeito possui uma grande variedade de causas, sendo as cadastradas como alto impacto as seguintes: via de interconexão dentro do pad de solda (C16), impressão de pasta de solda desalinhada (C17) e impressão de pasta de solda faltando (C19).

Assim, é esperado que o sistema apresente como causas com maior probabilidade de originarem o defeito “ausência e insuficiência de pasta de solda” as causas C16, C17 e C19.

A Figura 4.2 mostra o resultado da simulação. Nessa figura, as primeiras linhas correspondem à inicialização dos agentes (linhas 1 a 3), seguido do envio de uma mensagem (/AOI/+AIS) contendo o defeito AIS localizado pela AOI do AgenteAOI para o AgenteEspecialistaAOI (linhas 5 a 8).

Nas linhas 10 a 12 o AgenteEspecialistaAOI confirma o recebimento da mensagem e adiciona o defeito AIS como uma evidência na sua rede bayesiana e nas linhas 13 a 15 é apresentado o resultado com as três causas com maiores probabilidades da rede bayesiana após a atualização das tabelas de probabilidades, que são: C16, C17 e C19.

Esse resultado, junto com suas respectivas probabilidades, é enviado para o AgenteGerenteDeInspeção nas linhas 18 e 19. O AgenteGerenteDeInspeção confirma o recebimento dessas causas nas linhas 21 e 22 e nas linhas seguintes são mostrados os dados recebidos.

Figura 4.2 - Resultado da simulação do cenário 2

```

1  AgenteGerenteDeInspecao: inicializado!
2  AgenteAOI: inicializado!
3  AgenteEspecialistaAOI: inicializado!
4
5  AgenteAOI: Defeitos encontrados.
6  AgenteAOI: Enviando mensagem para AgenteEspecialistaAOI
7  AgenteAOI: Mensagem enviada para AgenteEspecialistaAOI:
8  /AOI/+AIS
9
10 AgenteEspecialistaAOI: Mensagem recebida: /AOI/+AIS
11 AgenteEspecialistaAOI: Defeitos: +AIS
12 AgenteEspecialistaAOI: Adicionando evidência AIS
13 AgenteEspecialistaAOI: Causa 1: C16 0.532608687877655
14 AgenteEspecialistaAOI: Causa 2: C17 0.532608687877655
15 AgenteEspecialistaAOI: Causa 3: C19 0.532608687877655
16 AgenteEspecialistaAOI: AgenteGerenteDeInspecao encontrado.
17 Enviar resultado.
18 AgenteEspecialistaAOI: Mensagem enviada para AgenteGerenteDeInspecao:
19 /AOI/+AIS/+C16_0.532608687877655+C17_0.532608687877655+C19_0.532608687877655
20
21 AgenteGerenteDeInspecao: Mensagem recebida:
22 /AOI/+AIS/+C16_0.532608687877655+C17_0.532608687877655+C19_0.532608687877655
23 AgenteGerenteDeInspecao: Maquina que identificou o defeito: AOI
24 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: AIS
25 AgenteGerenteDeInspecao: Número de causas recebidas: 3
26 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C16. Probabilidade: 53,26%
27 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C17. Probabilidade: 53,26%
28 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C19. Probabilidade: 53,26%
29 AgenteGerenteDeInspecao: Resposta final:
30 Causa: C16. Probabilidade: 53,26%
31 Causa: C17. Probabilidade: 53,26%
32 Causa: C19. Probabilidade: 53,26%

```

Assim, nas linhas 23 a 28 o AgenteGerenteDeInspeção mostra a máquina que identificou o defeito, qual defeito foi identificado e as causas recebidas do agente especialista que possuem maior probabilidade, são elas: Causa C16, C17 e C19, todas com 53,26% de probabilidade.

Como todas as causas possuem a mesma probabilidade, o resultado final mostrado nas linhas 29 a 32 são as três causas já apresentadas: C16 (via de interconexão dentro do pad de solda), C17 (impressão de pasta de solda desalinhada) e C19 (impressão de pasta de solda faltando), todas com probabilidade de 53,26%.

O agente especialista retornou exatamente as três causas que foram cadastradas como alto impacto na tabela relacionada ao defeito AIS, portanto o resultado apresentado é compatível com o resultado esperado.

Apesar disso, pode-se observar que a apresentação de todas as causas com probabilidades não apresenta melhor eficácia que o sistema proposto por Vargas (2012), já que o sistema de Vargas (2012) apresenta causas com probabilidades iguais.

Portanto, no caso de utilização do sistema apresentado em um cenário onde um só defeito foi detectado, porém esse defeito possui múltiplas possibilidades de causas, o sistema não apresenta ganhos ou perdas em relação ao sistema de Vargas (2012), e sim o mesmo desempenho quanto à resposta.

#### **4.1.3 Cenário 3: múltiplos defeitos com uma única causa**

O terceiro cenário simulado representa a aquisição de vários defeitos detectados por uma máquina de inspeção e esses defeitos são originados por uma causa em comum. Para simulação desse cenário foram utilizados os defeitos “componente extra” (CE) e “posição incorreta” (PI).

Ambos fazem parte da rede da insersora de componentes e a partir da análise da tabela de Doro (2012), foi constatado que o defeito CE possui apenas uma causa cadastrada, que é a C47, e o defeito PI possui quatro causas possíveis: C47, C49, C56 e C57. Como se pode observar, os defeitos CE e PI possuem a causa C47 (programação incorreta) em comum.

Desse modo, espera-se que o sistema identifique que os dois defeitos possuem uma origem em comum e assim aponte a causa C47 como a causa com maior probabilidade de ter originado os dois defeitos juntos. O resultado desse teste é apresentado na Figura 4.3.

Como nos exemplos anteriores, as primeiras linhas apresentadas na figura fazem parte da inicialização dos agentes. Nas linhas 5 a 8, o AgenteS2iAOI envia uma mensagem para o AgenteEspecialistaS2iAOI informando que ele identificou os defeitos CE e PI (/S2iAOI/+CE+PI).

Figura 4.3 - Resultado da simulação do cenário 3

```

1  AgenteGerenteDeInspecao: inicializado!
2  AgenteS2iAOI: inicializado!
3  AgenteEspecialistaS2iAOI: inicializado!
4
5  AgenteS2iAOI: Defeitos encontrados.
6  AgenteS2iAOI: Enviando mensagem para AgenteEspecialistaS2iAOI
7  AgenteS2iAOI: Mensagem enviada para AgenteEspecialistaS2iAOI:
8  /S2iAOI/+CE+PI
9
10 AgenteEspecialistaS2iAOI: Mensagem recebida: /S2iAOI/+CE+PI
11 AgenteEspecialistaS2iAOI: Defeitos: +CE+PI
12 AgenteEspecialistaS2iAOI: Adicionando evidência CE
13 AgenteEspecialistaS2iAOI: Adicionando evidência PI
14 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 1: C47 1.0
15 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 2: C57 0.615384578704834
16 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 3: C49 0.5769230723381042
17 AgenteEspecialistaS2iAOI: AgenteGerenteDeInspecao encontrado.
18 Enviar resultado.
19 AgenteEspecialistaS2iAOI: Mensagem enviada para AgenteGerenteDeInspecao:
20 /S2iAOI/+CE+PI/+C47_1.0+C57_0.615384578704834+C49_0.5769230723381042
21
22 AgenteGerenteDeInspecao: Mensagem recebida:
23 /S2iAOI/+CE+PI/+C47_1.0+C57_0.615384578704834+C49_0.5769230723381042
24 AgenteGerenteDeInspecao: Maquina que identificou o defeito: S2iAOI
25 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: CE
26 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: PI
27 AgenteGerenteDeInspecao: Número de causas recebidas: 3
28 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C47. Probabilidade: 100%
29 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C57. Probabilidade: 61,54%
30 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C49. Probabilidade: 57,69%
31 AgenteGerenteDeInspecao: Resposta final:
32 Causa: C47. Probabilidade: 100%
33 Causa: C57. Probabilidade: 61,54%
34 Causa: C49. Probabilidade: 57,69%

```

Nas linhas 10 a 13 o AgenteEspecialistaS2iAOI confirma o recebimento da mensagem e adiciona os defeitos recebidos CE e PI como evidências em sua rede bayesiana.

Após a atualização da tabela de probabilidades, o resultado das três causas com maior probabilidade de terem originado os defeitos recebidos é mostrado nas linhas 14 a 16.

Esse resultado é enviado para o AgenteGerenteDeInspeção (linhas 17 a 20), que por sua vez confirma o recebimento e mostra que a máquina que detectou os defeitos foi a S2iAOI, os defeitos detectados (CE e PI) e as causas encontradas pelo AgenteEspecialistaS2iAOI com suas respectivas probabilidades (linhas 22 a 30).

O AgenteGerenteDeInspeção confirma o resultado recebido na resposta final, apresentando como causas com maior probabilidade as

causas C47 com 100% de probabilidade, C57 com 61,54% e C49 com 57,69%.

O agente especialista retornou como causa com maior probabilidade exatamente a única causa em comum que os dois defeitos possuem (C47) e como segunda e terceira opções duas causas que são relacionadas com o defeito PI, uma catalogada como alto impacto (C57) e outra como médio impacto (C49).

Assim, o resultado apresentado pelo sistema foi compatível com a análise humana da tabela, apresentando o mesmo resultado que um ser humano daria tendo como base a tabela de Doro (2012).

Neste cenário, pode-se dizer que o sistema apresentado demonstrou melhora no desempenho com relação à apresentação de respostas mais delineadas de acordo com os defeitos, pois ele conseguiu identificar que os defeitos detectados possuem uma causa em comum.

Se esse cenário fosse utilizado no sistema proposto por Vargas (2012), ele apresentaria como solução quatro causas possíveis, todas com a mesma probabilidade de ser a origem dos defeitos.

Dessa maneira, nesse cenário o sistema já apresenta uma melhora no diagnóstico em relação ao sistema proposto anteriormente, já que ele reduz o número de causas possíveis para três e ainda apresenta probabilidades diferentes para cada causa, sendo uma delas com probabilidade de 100% de ter causado os defeitos.

#### **4.1.4 Cenário 4: múltiplos defeitos com múltiplas causas**

O quarto cenário simula a aquisição de vários defeitos pela máquina de inspeção e esses defeitos possuem diversas possibilidades de causas. Para esse cenário foram utilizados os defeitos “componente faltando” (CF), “face invertida” (FI) e “componente extra” (CE), todos relacionados à rede de inserção de componentes.

Seguindo a análise da tabela de Doro (2012), as principais causas do defeito “componente faltando” (CF) são: pouca aderência da pasta de solda (C36), programação incorreta (C47), pressão baixa de inserção (C52) e funcionamento inadequado das inseridoras de componentes SMT (C57).

O defeito “face invertida” (FI) possui apenas uma causa principal: posição incorreta do componente na embalagem (C49) e o defeito “componente extra” (CE) também possui apenas uma causa principal: programação incorreta (C47).



Como se pode observar, os defeitos CF e CE possuem uma causa comum: programação incorreta da insersora de componentes (C47). Considerando que existe uma causa que pode produzir os dois defeitos simultaneamente, espera-se que o sistema identifique essa relação entre os defeitos e considere esta causa como uma grande probabilidade de originar esses defeitos.

Já o defeito FI possui apenas uma causa possível, que é a C49, e, portanto ela também deve aparecer no diagnóstico com uma probabilidade alta. A Figura 4.4 mostra o resultado do diagnóstico do sistema.

Figura 4.4 - Resultado da simulação do cenário 4

```

1  AgenteGerenteDeInspecao: inicializado!
2  AgenteS2iAOI: inicializado!
3  AgenteEspecialistaS2iAOI: inicializado!
4
5  AgenteS2iAOI: Defeitos encontrados.
6  AgenteS2iAOI: Enviando mensagem para AgenteEspecialistaS2iAOI
7  AgenteS2iAOI: Mensagem enviada para AgenteEspecialistaS2iAOI:
8  /S2iAOI/+CF+FI+CE
9
10 AgenteEspecialistaS2iAOI: Mensagem recebida: /S2iAOI/+CF+FI+CE
11 AgenteEspecialistaS2iAOI: Defeitos: +CF+FI+CE
12 AgenteEspecialistaS2iAOI: Adicionando evidência CF
13 AgenteEspecialistaS2iAOI: Adicionando evidência FI
14 AgenteEspecialistaS2iAOI: Adicionando evidência CE
15 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 1: C47 1.0
16 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 2: C49 1.0
17 AgenteEspecialistaS2iAOI: Causa 3: C36 0.532608687877655
18 AgenteEspecialistaS2iAOI: AgenteGerenteDeInspecao encontrado.
19 Enviar resultado.
20 AgenteEspecialistaS2iAOI: Mensagem enviada para AgenteGerenteDeInspecao:
21 /S2iAOI/+CF+FI+CE/+C47_1.0+C49_1.0+C36_0.532608687877655
22
23 AgenteGerenteDeInspecao: Mensagem recebida:
24 /S2iAOI/+CF+FI+CE/+C47_1.0+C49_1.0+C36_0.532608687877655
25 AgenteGerenteDeInspecao: Maquina que identificou o defeito: S2iAOI
26 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: CF
27 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: FI
28 AgenteGerenteDeInspecao: Defeito recebido: CE
29 AgenteGerenteDeInspecao: Número de causas recebidas: 3
30 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C47. Probabilidade: 100%
31 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C49. Probabilidade: 100%
32 AgenteGerenteDeInspecao: Causa recebida: C36. Probabilidade: 53,26%
33 AgenteGerenteDeInspecao: Resposta final:
34 Causa: C47. Probabilidade: 100%
35 Causa: C49. Probabilidade: 100%
36 Causa: C36. Probabilidade: 53,26%

```

Os agentes são inicializados nas primeiras linhas da Figura 4.4. Nas linhas 5 a 8 o AgenteS2iAOI identifica os defeitos CF, FI e CE e os envia em forma de mensagem para o AgenteEspecialistaS2iAOI.

O AgenteEspecialistaS2iAOI confirma o recebimento dos defeitos e os adiciona como novas evidências na sua rede bayesiana nas linhas 10 a 14 e nas linhas 15 a 17 são apresentados as três causas com maior probabilidade de terem originado os três defeitos recebidos. Essas causas são enviadas junto com os defeitos para o AgenteGerenteDeInspeção nas linhas 18 a 21.

O AgenteGerenteDeInspeção confirma o recebimento dos dados e apresenta a máquina que identificou os defeitos (S2iAOI), os defeitos recebidos (CF, FI e CE) e as três causas recebidas e suas respectivas probabilidades: Causa C47 com 100%, causa C49 também com 100% e causa C36 com 53,26%.

O agente especialista retornou como causas com maior probabilidade exatamente as causas C47, que era a única causa em comum entre os defeitos CF e CE, e C49 que era a única causa registrada para o defeito FI. Essa era a resposta que seria dada por um ser humano a partir da análise da tabela de Doro (2012), portanto o sistema apresentou o resultado compatível com o esperado.

O agente especialista também apontou a causa C36 como uma possibilidade, porém com uma probabilidade muito menor que as outras duas causas. Analisando a tabela de Doro (2012), a causa C36 é uma das causas relacionadas como alto impacto do defeito CF, isso explica o fato do agente especialista também ter apontado essa causa como provável.

Se este mesmo cenário fosse testado no sistema de Vargas (2012), contendo como base de dados a tabela de Doro (2012), o resultado apresentaria todas as quatro causas registradas do defeito CF, e mais as causas do defeito FI e do defeito CE, totalizando pelo menos cinco causas diferentes, sem contar com as causas catalogadas como médio e baixo impacto, e todas com igual probabilidade de originarem os três defeitos recebidos.

Assim, comparando o resultado neste cenário do sistema proposto por Vargas (2012) com o sistema proposto neste trabalho, percebe-se que o sistema atual possui um melhor desempenho com relação aos resultados apresentados, pois ele reduziu a quantidade de causas relacionadas aos defeitos à apenas três causas, sendo duas delas com 100% de probabilidade, e reconheceu que existe uma causa em comum entre dois dos três defeitos detectados.

## 4.2 COMPARAÇÕES COM TRABALHOS ANTERIORES

A fim de identificar vantagens, desvantagens e melhorias no sistema proposto, o mesmo foi comparado com trabalhos anteriores que possuem propostas semelhantes. Para essa comparação foram utilizados dois trabalhos que utilizam sistemas especialistas voltados para produção de pequenas séries, o sistema proposto por Doro (2009) e o sistema proposto por Vargas (2012).

Devido ao fato dos dois trabalhos anteriores utilizarem abordagens e fontes de dados diferentes das utilizadas no trabalho apresentado, tornou-se inviável a realização de uma comparação real de desempenho utilizando os mesmos cenários, por exemplo, comparando tempos de respostas.

O que pôde-se fazer foi tentar “simular” o tipo de resposta dada pelo sistema de Vargas (2012) se ele utilizasse a mesma tabela utilizada como fonte de dados que foi utilizada neste trabalho, como mostrado nos itens 4.1.1 a 4.1.4. Desta forma, optou-se por ser realizada apenas uma comparação das características principais dos sistemas.

O trabalho de Doro (2009) é um sistema especialista cujo objetivo é determinar as raízes dos problemas em uma linha de montagem de placas de circuito impresso e propor soluções. Ele utilizou como ferramenta para criação do sistema o Expert Sinta, que atualmente está descontinuado.

A solução de Doro (2009) utiliza apenas um defeito como entrada, o software interage diretamente com o usuário através de perguntas sobre diversas situações mais amplas que podem ter gerado o defeito apresentado, como por exemplo se as propriedades do fluxo estão adequadas ou inadequadas. A partir do momento que a causa provável é encontrada ele indica outras possíveis causas mais específicas, voltadas ao fato da causa raiz estar inadequada e apresenta uma lista de ações para a correção dos problemas.

As desvantagens desse sistema é que ele depende do usuário para encontrar a resposta e isso é inadequado, pois a percepção do ser humano não é única e imutável, e sim varia a partir de aspectos internos e de seu contato com o mundo.

Por exemplo, uma avaliação visual humana sobre a qualidade de uma impressão de pasta de solda será variável de acordo com o seu avaliador. Ela estando levemente borrada, um avaliador pode achar que ela está dentro dos parâmetros enquanto um segundo avaliador acha que está fora dos parâmetros. Isso tudo porque o julgamento humano é

subjetivo, logo o que está adequado para um pode estar inadequado para outro.

A dependência de uma avaliação que pode ser parcial pode gerar uma inconsistência no sistema. Além disso, o sistema não permite a troca de mensagens diretamente entre as máquinas, ficando sujeito ao operador tomar a decisão de modificar ou não algo na linha de produção.

Outra desvantagem é que o sistema faz o diagnóstico de apenas um defeito por vez e leva em consideração apenas uma propriedade quando dita “inadequada”. A vantagem desse sistema é que ele já encontra-se implementado no LABElectron e mostrando-se satisfatório para os propósitos aos quais ele se propõe.

O trabalho de Vargas (2012) apresenta melhoras quando comparado ao de Doro (2009) no sentido da quantidade de defeitos analisados. Vargas (2012) também propôs um sistema especialista para diagnóstico de defeitos em linhas de montagem de PCB utilizando sistemas multiagentes. O sistema foi desenvolvido utilizando a ferramenta Jason, um interpretador para uma versão da linguagem AgentSpeak utilizada para a comunicação entre agentes e que está constantemente recebendo atualizações.

O sistema proposto por Vargas (2012) faz o diagnóstico de vários defeitos detectados por vez e não exige a presença de operadores humanos, visto que os defeitos são recebidos diretamente dos agentes das máquinas responsáveis pela inspeção das PCI pelo agente de diagnóstico, e também apresenta uma proposta de solução para o problema.

A desvantagem desse sistema é que os defeitos são avaliados individualmente e para cada defeito recebido o diagnóstico entrega como resultado todas as possíveis causas relacionadas ao defeito em questão, sem considerar maior ou menor grau de impacto da causa. Portanto, quando um defeito possui várias causas possíveis, o sistema iria alterar todas as configurações, o que pode levar à criação de novos defeitos.

Já o sistema proposto neste trabalho, também utiliza a tecnologia de sistemas multiagentes e não necessita de um operador para a realização de diagnóstico, mas a grande vantagem é que ele possui a capacidade de analisar os defeitos em conjunto.

Isso é importante, pois é comum que diferentes defeitos possuam origens em comum, isso restringe a quantidade de causas possíveis relacionadas ao acontecimento de defeitos diferentes. Além disso, o sistema retorna no máximo três causas para serem observadas pelo

agente gerente de inspeção. Essa vantagem foi mostrada nos itens 4.1.3 e 4.1.4.

O agente responsável pela gerência de inspeção deve ser capaz de analisar os dados recebidos do sistema de diagnóstico e compará-los com os dados de configuração utilizados atualmente na linha de produção e então tomar uma decisão de quais parâmetros devem ser corrigidos.

A desvantagem do sistema apresentado é que para ser utilizado ele precisa de uma reestruturação da linha de produção já existente, pois o maquinário atual não utiliza o conceito de agentes, sendo necessária então a agentificação da linha.

Além disso, no caso de apenas um defeito ser detectado, a análise bayesiana não apresentará grande vantagem, pois o resultado será todas as causas que estão registradas como de alto impacto para aquele determinado defeito, como mostrado nos testes dos itens 4.1.1 e 4.1.2.

Por fim, a principal desvantagem da utilização de redes bayesianas é o crescimento exponencial da memória RAM requerida para a criação e a compilação de redes, especialmente nos casos onde os nodos de defeitos possuem vários nodos de causas possíveis relacionadas.

Devido a essa particularidade, dois defeitos deixaram de ser adicionados ao sistema especialista, como foi explicado no item 3.3.1. Porém, isso pode ser superado a partir da utilização de melhores técnicas de gerenciamento de memória. A Tabela 4.1 mostra o resumo da comparação dos três trabalhos.

Assim, pode-se concluir que o sistema desenvolvido neste trabalho apresentou melhoras em relação aos trabalhos anteriores no sentido de que ele é capaz de analisar os defeitos em conjunto, estabelecendo relações entre defeitos que possuem causas em comum. E na análise de apenas um defeito o sistema apresentaria igual desempenho quando comparado aos sistemas anteriores.

O sistema atual também diminui a quantidade de causas possíveis relacionadas aos defeitos, permitindo assim que no caso de defeitos em placas de circuito impresso no máximo três causas sejam apresentadas ao gerente de inspeção para que seus parâmetros sejam verificados, reduzindo o espectro de possibilidades às mais prováveis.

Além disso, ele ainda estabelece uma relação de probabilidade entre as causas, dando uma informação a mais para o gerente de inspeção decidir qual deve ser o parâmetro a ser reconfigurado.

Tabela 4.1 - Comparação entre os sistemas analisados

Sistema Características	Doro (2009)	Vargas (2012)	Proposta atual
Tecnologia	Sistema especialista	Sistema especialista e sistema multiagentes	Sistema especialista probabilístico e sistema multiagentes
Ferramenta	Expert Sinta	Jason	API Netica e JADE
Objetivo	Diagnóstico de um defeito	Diagnóstico de múltiplos defeitos	Diagnóstico de múltiplos defeitos
Vantagem	Já implantado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não necessita de operador humano</li> <li>- Diagnostica vários defeitos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não necessita de operador humano</li> <li>- Diagnostica vários defeitos</li> <li>- Defeitos são analisados em conjunto</li> </ul>
Desvantagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apenas um defeito detectado por vez</li> <li>- Necessidade de operador humano para diagnóstico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O diagnóstico é feito individualmente</li> <li>- Pesos iguais para todas as causas</li> <li>- Necessita de modificação de planta já existente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No caso de diagnóstico de defeito individual os resultados apresentados se restringem às causas de maior impacto.</li> <li>- Necessita de modificação de planta já existente</li> </ul>

Conclui-se então que o sistema é viável para utilização em diagnóstico de múltiplos defeitos em placas de circuito impresso, pois ele apresenta melhora na apresentação das respostas quando comparado

aos sistemas anteriores, além disso, o custo do sistema pode ser considerado baixo, pois o JADE é uma ferramenta gratuita. A API do Netica é licenciada comercialmente, porém existem outras APIs gratuitas que também trabalham com redes bayesianas.

Com relação às ferramentas utilizadas, o JADE é um *framework* de fácil utilização e configuração, sua sintaxe é intuitiva, possui documentação farta, alta usabilidade e é gratuito.

O Netica e sua API possuem uma interface *user-friendly*, que permitem uma grande usabilidade, além de possuírem uma rica documentação no site do fabricante, contendo diversos exemplos de como utilizar as ferramentas. Ele já é uma ferramenta consolidada, utilizada em diversos trabalhos e principalmente no meio educacional para ensino de redes bayesianas e possui licença comercial.

Com relação ao tempo de resposta dos agentes reativos (agentes de máquina de inspeção) e cognitivos (agentes especialistas), durante os testes, notou-se uma grande diferença no tempo de resposta desses agentes.

Assim, para verificar essa diferença, durante dez rodadas de execução do software foram medidos os tempos de execução de cada agente. Para os AgAOI e AgS2iAOI, foram utilizados o padrão de três defeitos a serem enviados para seus respectivos agentes especialistas. Para o AgSPI, que possui apenas dois defeitos cadastrados, foram utilizados os seus dois únicos defeitos que foram enviados ao seu agente especialista.

O AgAOI obteve uma média de 0,297 segundos para sua execução, já seu especialista, o AgEspecialistaAOI, obteve uma média de 17,77 segundos de execução.

O AgS2iAOI obteve a média de 0,321 segundos e o AgEspecialistaS2iAOI obteve uma média de execução de 8,108 segundos.

Já o AgSPI obteve uma média de 0,316 segundos, enquanto que o AgEspecialistaSPI obteve uma média de 7,766 segundos de tempo de execução.

Como se pode notar, a diferença do tempo de execução dos agentes reativos é muito grande em relação ao tempo de execução dos agentes cognitivos. Isso acontece, pois o cálculo utilizando as redes bayesianas e a verificação de quais são as maiores probabilidades demanda um tempo muito maior do que o tempo do agente reativo enviar os defeitos para o agente especialista.

Por esse mesmo motivo o AgEspecialistaAOI obteve a maior média de tempo de execução: ele possui a maior rede bayesiana (rede do

forno de refusão), sendo composta por 40 causas e 15 defeitos, enquanto que a rede do AgEspecialistaSPI, que é a rede da impressora de pasta de solda e foi a mais rápida, possui apenas 23 causas e 2 defeitos.

Assim, pode-se concluir que o tempo de resposta dos agentes cognitivos é muito maior que dos agentes reativos devido ao tamanho de suas redes bayesianas.

O sistema não apresentou erros, todas as respostas encontradas pelo sistema durante os testes foram respostas plausíveis e compatíveis com a que um humano daria a partir da análise da tabela de Doro (2012).

Porém o seu desempenho pode ser melhorado se forem acrescentados mais dados nas redes bayesianas, como uma lista de defeitos detectados e suas causas analisadas por um especialista e também os dados de frequência de quais causas são mais comuns e mais incomuns.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões e perspectivas deste trabalho.



## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foi apresentado o desenvolvimento de um sistema cuja função é o diagnóstico de causas geradoras de defeitos em uma linha de montagem de placas de circuito impresso. O sistema possui a flexibilidade de poder ser utilizado para qualquer tipo de PCI e de não ter a necessidade da utilização de histórico para a geração do diagnóstico, o que o torna adequado para ser utilizado em produções de pequenas séries.

Um fator de limitação para a criação do sistema foi a quantidade e a qualidade dos dados utilizados para a elaboração do mesmo. Para o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico com alto grau de confiabilidade nas respostas é necessária uma ação conjunta entre empresa e pesquisador.

Esse é um processo lento que exige grandes esforços de ambas as partes. Precisam ser coletados dados do processo durante o processo, pois frequentemente as empresas não possuem dados históricos de produção e de diagnóstico, e entrevistas devem ser realizadas com os especialistas, o que demanda tempo das duas partes.

Muitas vezes, o remanejamento do foco de trabalho desses colaboradores para o desenvolvimento desse tipo de pesquisa é visto como um desperdício. Isso é realidade na maioria das empresas brasileiras de montagem de PCI.

Em razão da falta de dados sobre o processo de produção e sobre a relação causa-defeito, o modelo construído sofreu limitação de dados de entrada.

A utilização de dados mais específicos sobre a relação causa-defeito em montagem de placas de circuito impresso permitiria uma maior precisão na resposta do sistema, como por exemplo, se tivesse a informação da frequência com que ocorrem as causas catalogadas.

Outra limitação foi a demanda de maior processamento computacional exigida pela utilização de uma rede bayesiana com uma quantia grande de relacionamentos.

Essa limitação impediu que duas redes relacionadas à defeitos da aplicação de pasta de solda fossem desenvolvidas. Porém, com o desenvolvimento de uma API que efetue os cálculos bayesianos com um melhor gerenciamento de memória, esse problema pode ser contornado.

Apesar disso, a utilização de redes bayesianas é uma alternativa flexível e que pode ser expandida para absorver novos tipos de dados se necessário.

O desenvolvimento desse sistema mostrou a viabilidade da integração das técnicas de redes bayesianas e de sistemas multiagentes. A utilização de uma API para a criação das redes bayesianas e da Plataforma JADE para integração das redes com os agentes permite que o sistema possa interagir com outras plataformas de sistemas multiagentes como, por exemplo, a interação com agentes criados a partir da utilização da ferramenta Jason, que também é utilizada no projeto COGMET. Além disso, apesar de ter sido desenvolvido no ambiente Windows, o sistema pode ser migrado para utilização em ambiente Linux.

Quando comparado ao sistema atualmente utilizado no LabElectron, que foi proposto por Doro (2009), e ao sistema desenvolvido por Vargas (2012), o trabalho desenvolvido mostra-se mais completo, pois além dele possuir a capacidade de diagnosticar mais de um defeito por vez, ele ainda realiza a análise dos defeitos em conjunto para a produção do diagnóstico, o que proporciona um resultado mais delineado que o resultado dos sistemas propostos anteriormente.

O sistema também estreita a quantidade de respostas ao limitar que a resposta final seja restrita às três causas com maior probabilidade de estarem originando os defeitos diagnosticados.

Finalmente, os resultados obtidos através de cenários de simulação demonstram que o sistema desenvolvido atende aos objetivos inicialmente determinados de melhorar o diagnóstico dos defeitos, porém o desempenho do sistema quando utilizado para diagnóstico de apenas um defeito é igual aos sistemas propostos anteriormente.

Devido a problemas técnicos, o sistema não pôde ser avaliado dentro da linha de produção e seus resultados não puderam ser comparados aos problemas reais e ao diagnóstico de especialistas e por isso não foi possível obter um resultado do quão corretas são as respostas dadas pelo sistema.

Mesmo assim, no geral pode-se afirmar que o sistema apresenta desempenho satisfatório para ser utilizado em uma linha de produção de montagem de placas de circuito impresso, se considerado que ele efetua diagnósticos corretos quando comparados a respostas obtidas a partir da análise da tabela de relação causa-defeito, que foi utilizada como base de conhecimento.

O trabalho desenvolvido originou um artigo intitulado “*Artificial Intelligent Systems for Quality Assurance in Small Series Production*” (STEMMER, COSTA, *et al.*, 2013) que foi apresentado no 11º *International Symposium on Measurement Technology and Intelligent*

*Instruments* (ISMTII) em Aachen, Alemanha e foi aceito para publicação nos *proceedings* do evento.

## 5.1 PERSPECTIVAS

O sistema proposto pode servir de base para o desenvolvimento de outros trabalhos visando à melhoria do mesmo. Sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Expandir a rede bayesiana possibilitando a inclusão de mais dados relativos ao setup do produto, por exemplo, acrescentar como entrada o tipo de placa e também se é utilizada inserção manual durante o processo.
- A realização de um estudo que aponte as causas recorrentes e também as causas menos frequentes aumentaria a precisão do resultado obtido pelas redes bayesianas dado que atualmente todas as causas possuem em média 50% de chance de estarem presentes inicialmente.
- A criação de um banco de dados com as respostas obtidas para ser utilizada como realimentação do sistema é fundamental para melhorar a qualidade da resposta do sistema apresentado e permitiria inclusive que o aprendizado das probabilidades da rede seja realizado dinamicamente.



## REFERÊNCIAS

BAYES, T.; PRICE, R. An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the late Rev. Mr. Bayes, communicated by Mr. Price, in a letter to John Canton, M. A. and F. R. S. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Londres, v. 53, p. 370-418, 1763.

BELLIFEMINE, F.; POGGI, A.; RIMASSA, G. **JADE-A FIPA-compliant agent framework**. Proceedings of PAAM. [S.l.]: [s.n.]. 1999. p. 97-108.

BORDINI, R. H.; HUBNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming multi agent systems in AgentSpeak using Jason**. [S.l.]: Wiley, 2007.

BRUSTOLONI, J. C. **Autonomous Agents: Characterization and Requirements**. Carnegie Mellon University. Pittsburgh. 1991. (CMU-CS-91-204).

BURR, D. **Solder Paste Inspection: Process Control for Defect Reduction**. International Test Conference. [S.l.]: [s.n.]. 1997. p. 1036.

CAI, B. et al. Multi-source information fusion based fault diagnosis of ground-source heat pump using Bayesian network. **Applied Energy**, v. 114, p. 1-9, Fevereiro 2014.

CARRERA, Á. et al. A real-life application of multi-agent systems for fault diagnosis in the provision of an Internet business service. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 37, p. 146-154, Janeiro 2014.

CHARNIAK, E. Bayesian Networks without Tears. **AI Magazine**, v. 12, p. 150-63, 1991.

CHENG, S.-R. et al. **A framework of an intelligent real-time decision support system for process control in electronics assembly**. Proceedings of the Twenty-Ninth Southeastern Symposium on System Theory. [S.l.]: [s.n.]. 1997. p. 544-548.

CONWAY, P. P. et al. **Process variables in the reflow soldering of surface mount**. 8th Electronic Manufacturing Technology Symposium. [S.l.]: [s.n.]. 1990. p. 385-394.

DAVÉ, V. R. et al. Strategy for Small-Lot Manufacturing In-process monitoring and control. **Los Alamos Science**, v. 28, p. 63-67, 2003.

DORO, M. M. **Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.

DORO, M. M. **Solução integrada para auxiliar na garantia da qualidade na produção em pequenos lotes**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.

DORO, M. M. **Treinamento de Garantia da Qualidade em Placas Eletrônicas - Defeitos e Causas**. Florianópolis. 2012.

DORO, M. M.; DONATELLI, G. D.; SCHNEIDER, C. A. Redes Bayesianas para dar suporte ao planejamento da inspeção na produção em pequenos lotes. **Produto & Produção**, v. 10, p. 28-43, Junho 2009.

DUVALL, P. M.; MATYAS, S.; GLOVER, A. **Continuous Integration: Improving software quality and reducing risk**. India: Pearson Education, 2007.

ENGELS, F. **Socialism: Utopian and Scientific**. Austrália: Resistance Book, 1999.

FIPA. FIPA Communicative Act Library Specification, 2002. Disponível em: <<http://www.fipa.org/specs/fipa00037/SC00037J.pdf>>. Acesso em: Janeiro 2014.

FIPA. The Foudation for Intelligent Physical Agents, 2014. Disponível em: <<http://www.fipa.org>>. Acesso em: Janeiro 2014.

GEBUS, S.; JUUSO, E. K. **Defect Detection on Printed Circuit Boards using Linguistic Equations applied to Small Batch Processes**. Eunite 2002 Symposium. [S.l.]: [s.n.]. 2002. p. 545-550.

HALLENBORG, K.; DEMAIZEAU, Y. **Dynamical Control in Large-Scale Material Handling Systems through Agent Technology**. IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 637-645.

HAN, T.; LI, B.; XU, L. **A universal fault diagnostic expert system based on Bayesian**. Proc. of the International Conference on Computer Science and Software Engineering CSSE 2008. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 260-263.

HITOMI, K. Manufacturing Technology in Japan. **Journal of Manufacturing Systems**, Kyoto, v. 12, p. 209-215, Janeiro 1993.

JADE. **Java Agent DEvelopment Framework**, 2013. Disponível em: <jade.tilab.com>. Acesso em: 1 Agosto 2013.

JENSEN, F. V. Bayesian networks basics. **AISB quarterly**, p. 9-22, 1996.

JENSEN, F. V.; NIELSEN, T. D. **Bayesian Networks and Decision Graphs**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Springer, 2007.

JIANG, X. et al. **Research on multi-type & small batch oriented process quality control system under network environment**. IEEE International Conference on Automation and Logistics. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 869-874.

JUNG, J. L. **Concepção e Implementação de um Agente Semiótico como Parte de um modelo Social de Aprendizagem a Distância**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

KUSIAK, A.; KURASEK, C. **Data Mining of Printed-Circuit Board Defects**. IEEE Transactions on Robotics and Automation. [S.l.]: [s.n.]. 2001. p. 191-196.

LEE, S.-M.; ABBOTT, P. A. Bayesian networks for knowledge discovery in large datasets: basics for nurse researchers. **Journal of Biomedical Informatics**, v. 36, Issues 4-5, p. 389-399, Outubro 2003.

MA, J.; TEHRANIPOOR, M. Background on VLSI Testing. In: TEHRANIPOOR, M.; WANG, C. **Introduction to Hardware Security and Trust**. [S.l.]: Springer, 2011. Cap. 1, p. 6-7.

MAES, P. Artificial Life Meets Entertainment: Life like Autonomous Agents. **Communications of the ACM**, v. 38, p. 108-114, 1995.

MARX, K. **O capital - Crítica da economia política**. Os Economistas. ed. São Paulo: Nova Cultural Ltda, v. I, 1996.

MARZOUGUI, B.; BARKAOUI, K. Interaction Protocols in Multi-Agent Systems based on Agent Petri Nets Model. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)**, v. 4, N. 7, p. 166-173, 2013.

MELO, D. F. F. D. **Desenvolvimento de máquina automática para inspeção óptica de placas de circuito impresso em pequenas séries**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.

MONDEN, Y. **Produção sem estoques - Uma abordagem prática ao sistema de produção Toyota**. São Paulo: IMAM, 1984.

NETO, J. P. B. **Modelagem de Um Sistema Multiagente para Aplicação em Ambientes Industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2007.

NORSYS Software Corporation. **Netica Application**, 2012. Disponível em: <<http://www.norsys.com/netica.html>>. Acesso em: 1 Agosto 2012.

PFEIFER, T. et al. **Cognitive Production Metrology: A new concept for flexibly attending the inspection requirements of small series production**. Proceedings of the 36th International MATADOR Conference. [S.l.]: Springer. 2010. p. 359-362.



POSLAD, S. Specifying protocols for multi-agent systems interaction. **ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)**, New York, v. 2 Issue 4, Novembro 2007.

QUEIROZ, C. D. N. **Redes Bayesianas no gerenciamento e mensuração de riscos operacionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 35. 2008.

REID, R. D.; SANDERS, N. R. **Operations Management**. 5. ed. [S.l.]: Wiley, 2012.

RENOOIJ, S.; WITTEMAN, C. Talking probabilities: communicating probabilistic information with words and numbers. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 22, p. 169-194 , 1999.

ROLOFF, M. L. **Um sistema multiagente para produção de pequenas séries**. Qualificação de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A modern approach**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

SAHEKI, A. H. **Construção de uma Rede Bayesiana aplicada ao diagnóstico de doenças cardíacas**. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecatrônica), Universidade de São paulo. São Paulo. 2005.

SCHMITT, R. et al. **Multiagent-based approach for the automation and quality assurance of the small series production**. 2011 IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). [S.l.]: [s.n.]. 2011. p. 1-8.

SHAH, R.; WARD, P. T. Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance. **Journal of Operations Management**, v. 21, p. 129-149, Março 2003.

SIMON-ZANESCU, D.; STREZA, F.; SVASTA, P. **Complex evaluation of SMT defects**. 27th International Spring Seminar on

Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress. [S.l.]: [s.n.]. 2004. p. 53-57.

STEMMER, M. R. et al. **Artificial Intelligent Systems for Quality Assurance in Small Series Production**. 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII). Aachen: [s.n.]. 2013.

TIAN, X. et al. Fault Diagnosis Research of Submarine Casing Curring Robot for Abandoned Oil Wellhead. **International Journal of Secutiry and Its Applications**, v. 8, p. 218-224, 2014.

VARGAS, J. **Sistema especialista de diagnóstico e tomada de decisão para garantia de qualidade na montagem de placas de circuito impresso em pequenas séries**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2012.

VENKATESWARAN, S. et al. **A realtime process control system for solder paste stencil printing**. Twenty-First IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 1997. [S.l.]: [s.n.]. 1997. p. 62-67.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. **A máquina que mudou o mundo**. 10ª. ed. São Paulo: Elsevier, 2005.

WOOD JR., T. Fordismo, toyotismo e volvismo: os caminhos da indústria em busca do tempo perdido. **Revista de administração de empresas**, São paulo, v. 32, p. 6-18, Set/Out 1992.

WOOLDRIDGE, M. J. **Introduction to Multiagent Systems**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

WOOLDRIDGE, M. J.; JENNINGS, N. R. Agent theories, architectures, and languages: a survey. **Intelligent agents**, v. 890, p. 1-39, 1995.

## ANEXO A – SIGLAS DE DEFEITOS

Defeito	Sigla	Rede
Pasta de solda desalinhada	PSD	Printer
Excesso de pasta de solda	EPS	
Componente faltando	CF	Inersora
Componente extra	CE	
Face invertida	FI	
Posição incorreta	PI	
Altura incorreta	AI	
Componente incorreto	CI	
Componente desalinhado	CD	
Componente trincado	CT	
Ausência e insuficiência de solda	AIS	Forno
Curto	Curto	
Excesso de solda	ES	
Bolas de solda	BS	
Gota de solda	GS	
Buraco na solda	BuS	
Não molhagem / Molhagem retrocedida	NmMr	
Solda fria ou trincada	SFT	
Tombstone	T	
Componente trincado	CT_Forno	
Componente desalinhado	CD_Forno	
Componente faltando	CF_Forno	
Componente eletricamente defeituoso	CED	
Empenamento da PCI	E_PCI	
Delaminação da PCI	D_PCI	



## ANEXO B – SIGLAS DE CAUSAS

Causa	Sigla
Dimensões do componente fora das tolerâncias	C1
Terminais ou substrato do componente não coplanares	C2
Soldabilidade inadequada dos componentes ou da placa de circuito impresso	C3
Máscara de solda sobressalente	C4
Máscara de solda desalinhada	C5
Deflexão excessiva da placa de circuito impresso	C6
Placa de circuito impresso suja	C7
Fabricação imprópria da placa de circuito impresso	C8
Fabricação imprópria do componente	C9
Pad de solda muito largo	C10
Pad de solda muito estreito	C11
Pad de solda muito longo	C12
Pad de solda muito próximo	C13
Pad de solda com tamanho desigual	C14
Pad de solda compartilhado	C15
Via de interconexão dentro do pad de solda	C16
Impressão de pasta de solda desalinhada	C17
Impressão de pasta de solda em excesso	C18
Impressão de pasta de solda faltando	C19
Impressão de pasta de solda borrada	C20
Abertura do estêncil estreita	C21
Abertura do estêncil larga	C22
Formato incorreto da abertura do estêncil	C23
Linearidade e aspereza inadequado das aberturas do estêncil	C24
Espessura do estêncil fina	C25
Espessura do estêncil grossa	C26
Estêncil danificado	C27
Abertura do estêncil obstruída	C28
Falta de limpeza na parte de baixo do estêncil	C29
Estêncil desalinhado	C30
Tamanho excessivo da partículas de solda da pasta de solda	C31
Lâmina do rodo danificada	C32
Viscosidade baixa da pasta de solda	C33
Viscosidade alta da pasta de solda	C34
Baixa atividade do fluxo da pasta de solda	C35

Pouca aderência da pasta de solda	C36
Pasta de solda expirou sua vida útil ou deteriorou	C37
Pressão incorreta do rodo	C38
Velocidade incorreta de impressão	C39
Ângulo de ataque incorreto	C40
Distância grande entre estêncil e placa (Snap-off ou gap)	C41
Configuração incorreta do limite mecânico do rodo (Down Stop)	C42
Velocidade alta de separação entre estêncil e PCI (Liff-off)	C43
Alimentação incorreta da pasta de solda (falta, excesso, mau espalhada)	C44
Funcionamento inadequado da aplicadora de pasta de solda	C45
Inserção desalinhada do componente	C46
Programação incorreta	C47
Alimentação incorreta do componente (tipo, código ou valor)	C48
Posição incorreta do componente na embalagem (fita, bandeja, tubos)	C49
Sistema de fixação da placa ineficiente	C50
Pressão alta de inserção	C51
Pressão baixa de inserção	C52
Velocidade alta de inserção	C53
Equalização do vácuo de ar (blow-off) alta	C54
Equalização do vácuo de ar (blow-off) baixo	C55
Tipo de bucal (nozzle) incorreto	C56
Funcionamento inadequado das insersoras de componentes SMT	C57
Pré-aquecimento acelerado	C58
Temperatura baixa de pré-refusão	C59
Temperatura alta de pré-refusão	C60
Temperatura baixa de refusão	C61
Temperatura alta de refusão	C62
Resfriamento muito lento	C63
Resfriamento muito rápido	C64
Funcionamento inadequado do forno de refusão	C65
Descarga eletrostática (ESD)	C66
Umidade alta	C67
Temperatura alta	C68
Corrente de ar excessiva	C69